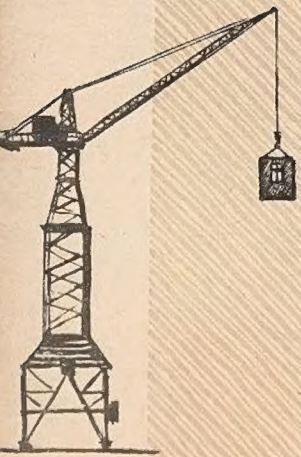
Общество по распространению
политических и научных знаний РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ДОМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОПАГАНДЫ
ЛДНТП

Л. А. ЮТКИН

ЭЛЕКТРО-ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ДРОБЛЕНИЕ

Часть I



Ленинград—1959

Общество по распространению политических и научных знаний РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ДОМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОПАГАНДЫ

Л. А. ЮТКИН

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ДРОБЛЕНИЕ

Часть I

(стенограмма лекции, прочитанной в ЛДНТП для инженерно-технических работников предприятий и учреждений строительной промышленности)

Серия — *Строительная промышленность*

Ленинград
1959

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть I

Введение 3

I. Физическая сущность некоторых процессов электрогидравлического разрушения материалов 4

1. Оптимальные режимы дробления . . . . . —
2. Метод получения «сверхдлинных» разрядов . . . . . —
3. Метод получения «реверсивных» разрядов 5
4. Метод управления потерями . . . . . —
5. Метод «грязного забоя» . . . . . —
6. Метод автоматического распределения (вращения) разрядов по всем радиусам сечения электрогидравлических устройств 6
7. Контакт материала с искрой . . . . . —

II. Электрогидравлические дробилки 9

1. Классификация дробилок . . . . . —
2. Типы электрогидравлических дробилок 10
   Щебеночные дробилки (ЭГДЩ) . . . . . —
   Песчаные дробилки (ЭГДП) 12
   Коллоидные дробилки (ЭГДК) 14
   Выборочные дробилки (ЭГДВ) 18
   Порционные дробилки (ЭГДЛ) 20
3. Конструктивные особенности электрогидравлических дробилок 23

III. Силовые установки питания электрогидравлических устройств . . 27

1. Силовая установка с использованием простейшей кенотронной схемы . . . . . —
2. Силовая установка с фильтровой емкостью и индуктивной заряжающей цепью рабочей емкости 30
3. Резонансные силовые установки 31

ВВЕДЕНИЕ

Электрогидравлическое дробление, при котором электрическая энергия непосредственно внутри объема дробилки переходит в полезную механическую работу, осуществляя разрушение материалов, является новым перспективным способом дробления и измельчения.

Электрогидравлическому дроблению и измельчению прежде всего могут подвергаться любые неметаллические материалы, а также хрупкие металлы или сплавы. Кроме того, этим способом может осуществляться сверхтонкое и коллоидное измельчение всех, в том числе и пластических, металлов.

Электрогидравлические дробилки (ЭГД) представляют собой непрерывно действующие конструктивно простые устройства, не имеющие никаких движущихся частей. ЭГД не нуждаются в применении особо прочных конструкций или материалов, практически не изнашиваются, а следовательно, и не засоряют материал примесями, они могут давать на одной ступени дробления заданную степень измельчения — при заданном гранулометрическом составе продукта — и могут обладать в одном агрегате практически любой производительностью. Изготовление их несложно и доступно любой механической мастерской.

ЭГД, осуществляя резко избирательное дробление, выдают в основном материал крупностью не выше заданного предела. Поэтому ЭГД могут найти применение для обогащения материалов или помола их, в том числе и для строительных целей.

При соблюдении соответствующих весьма несложных общеизвестных правил техники безопасности, ЭГД становятся установками безопасными в обращении, они легко автоматизируются и не требуют большого числа обслуживающего персонала высокой квалификации.

Рабочей средой в ЭГД служит любая жидкость и прежде всего — техническая вода.

При конструировании, изготовлении ЭГД и работе на них необходимо строгое соблюдение некоторых основных положений, определяющих свойства, назначение, поведение и форму всех элементов конструкции дробилок, а равно и технологию работы на них.

I. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Все объяснения физической сущности процессов, происходящих при электрогидравлическом дроблении, излагаются здесь в краткой конспективной форме в виде основных правил для руководства ими в практике.

1. Оптимальные режимы дробления

В силу специфических особенностей электрического разряда практические оптимальные режимы дробления в ЭГД с наибольшим механическим к. п. д. наступают при данной длине искры ($l = \text{const}$) на любой емкости C при соотношении

$$U_{опт} = kU_{min},$$

где $U_{опт}$ — напряжение при оптимальном режиме, *кв*;
U_{min} — минимальное пробивное напряжение, *кв*;
k — эмпирический коэффициент, равный 1,2—1,3.

Кроме того, механический к. п. д. будет тем выше, чем меньше индуктивность разрядного контура, чем ближе к нейтральному pH технической воды, чем выше напряжение, чем длиннее искра и чем меньше длительность искрового разряда.

Все эти факторы следует всемерно приближать к максимально осуществимым на практике.

2. Метод получения «сверхдлинных» разрядов

Для получения «сверхдлинных» разрядов во всех проводящих жидкостях необходимо:

а) уменьшать активную — соприкасающуюся с водой поверхность положительного электрода;

б) развивать активную поверхность отрицательного электрода.

При соблюдении этого правила пробой жидкости (технической воды) удается осуществить при градиенте в 1 *кв/см* длины расстояния между электродами.

Чем точнее выдержаны указанные условия, тем выше механический к. п. д. дробилки.

3. Метод получения «реверсивных» разрядов

Для небольших и очень маленьких по размерам порционных дробилок с очень малой длиной искры иногда целесообразно работать на «обратной полярности», при которой в больших дробилках наступает явление так называемого «реверсивного» или «пятящегося» разряда, и дробление практически прекращается.

«Реверсивный» разряд наступает в случае наличия большой активной поверхности положительного и малой активной поверхности отрицательного электрода.

Явление это при напряжении до 100 *кв* справедливо для больших длин рабочего искрового промежутка при большом значении соотношения площадей электродов. На малых длинах искры (порядка 5—15 *мм*) и малом значении соотношения площадей электродов закономерность меняет свой знак, и пробой возникает снова при малом градиенте напряжения.

Технолог, работающий на ЭГД, должен знать о существовании подобного явления с тем, чтобы в необходимых случаях использовать его или, наоборот, избежать его нежелательных последствий.

4. Метод управления потерями

Для уменьшения до минимума всегда имеющихся потерь энергии следует иметь в виду правило, согласно которому все элементы конструкции с положительной полярностью (кроме переднего конца положительного электрода, изолированного по всей длине), если они конструктивно неизбежны, должны быть:

а) возможно более удалены от плоскости отрицательного электрода (по перпендикулярному направлению к ней);

б) конструктивно поставлены в перпендикулярное по отношению к этой плоскости положение.

Это правило должно быть одним из основных при конструировании ЭГД.

5. Метод «грязного забоя»

Для управления оптимальным режимом процесса дробления следует иметь в виду, что пробивное напряжение в жидкости тем выше, чем она более загрязнена всякого рода механическими примесями, чем выше объемная концентрация этих примесей и, следовательно, чем более измельчен материал.

При неизменных — установленных режимом параметрах разряда это явление в начальной стадии процесса измельчения вызывает

увеличение апериодичности разряда и повышает его механический к. п. д., но затем при дальнейшем измельчении материала, если напряжение не повышать, нормальные рабочие пробои могут перейти в кистевые разряды, и процесс дробления практически прекратится.

В целях устранения вредных последствий этого явления и полного использования его положительных сторон в зону разряда тонкой струей непрерывно в очень небольшом количестве (не более 0,001—0,01 литра в секунду) вводится чистая вода.

Подбор режима воды осуществляется при пуске дробилки после определения оптимального напряжения. Сначала доводят работу дробилки на этом напряжении до полного затухания процесса, а затем, начиная подачу воды в зону разряда, восстанавливают нормальный процесс.

Излишняя подача воды в зону разряда для случаев тонкого измельчения очень вредна, так как режим разряда при этом выходит из оптимального, а, кроме того, сильная струя воды отодвигает материал от искры и, удаляя его из зоны дробления, резко снижает производительность, в силу чего к. п. д. дробилки резко падает.

Совершенно очевидно, что при крупном — щебневом дроблении излишняя подача воды особого значения не имеет.

6. Метод автоматического распределения (вращения) разрядов по всем радиусам сечения электрогидравлических устройств

Для полного использования всего объема зоны дробления в ЭГД необходимо, чтобы искровой разряд обегал всю окружность сечения дробилки и, охватывая тем самым возможно больший рабочий объем, вовлекал бóльшее количество материала в процесс дробления. Это очень важно для решения задачи получения большой производительности от небольших по габаритам дробилок.

Кроме того, желательно, чтобы разряд в первую очередь возникал прежде всего в тех местах, где материал менее всего измельчен, наиболее крупен, не вовлечен еще в процесс дробления.

Как оказалось, все эти требования к поведению разряда осуществляются автоматически им самим в соответствии с положениями «грязного забоя». При этом разряды как бы сами себя вытесняют с только что пройденных ими путей и переходят на другие, где материал менее измельчен и где, следовательно, пробивное напряжение меньше. В итоге получается автоматическое вращение разряда и своеобразный «выбор» им участков объема дробилки, заполненных самым крупным еще недостаточно раздробленным материалом.

7. Контакт материала с искрой

Из специфики процессов электрогидравлического дробления следует, что к. п. д. самой дробилки будет тем выше, чем более мелкие фракции материала предназначена она выдавать. Это объяс-

няются тем, что искра отдает энергию своей поверхностью, а следовательно, чем плотнее материал окружает зону разряда (чем он более измельчен), тем рациональнее и полнее расходуется выделяемая каналом разряда энергия.

На рис. 1 и 2 схематически показаны различные случаи контакта кусков материала с областью сверхвысоких ударных давлений зоны разряда.

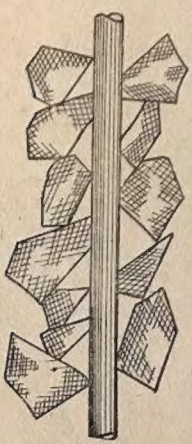


Рис. 1. Схема контакта крупных кусков материала с областью сверхвысоких давлений зоны разряда.

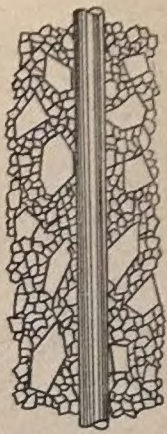


Рис. 2. Схема контакта мелких кусков материала с областью сверхвысоких давлений зоны разряда.

Из рис. 1 видно, что если материал дробится на щебень и, следовательно, вся мелочь уже удалена, то большая часть зоны сверхвысоких давлений не контактирует с материалом, в силу чего выделяемая искрой энергия расходуется непроизводительно, и к. п. д. дробилки весьма низок.

Если же материал дробится на тонкие фракции (рис. 2), а поэтому мелочи очень много, то зона сверхвысоких давлений контактирует с материалом практически всей своей поверхностью, в силу чего выделяемая искрой энергия расходуется более производительно и к. п. д. дробилки при этом повышается.

Электрогидравлический метод дробления на крупные фракции оказывается относительно менее выгодным или даже совсем невыгодным по сравнению с существующими методами дробления и, наоборот, при мелком дроблении с увеличением степени измельчения новый способ электрогидравлического дробления становится выгоднее существующих методов измельчения.

Из сказанного выше следует также, что для небольшой по длине искры будет трудно обеспечить быстрое, а главное надежное контактирование с большими по размерам кусками материала.

Таким образом, длина искры в любой дробилке, которая не может быть в силу конструктивных причин больше радиуса дробилки, кроме того, должна быть приведена в определенное соотношение с размерами загружаемых в дробилку крупных кусков материала.

Опыт показал, что для дробилок большого диаметра длина искры не должна быть меньше $^1/_3\,d$, где d — средний диаметр наибольших по размерам кусков загружаемого материала.

Для дробилок небольшого диаметра (с относительно малой возможной длиной искры) длина искры может быть больше этой нормы и достигать $1d - 3d$ и более.

II. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ДРОБИЛКИ

1. Классификация дробилок

Нами разработаны и испытаны в лабораторных условиях и на практике несколько типов ЭГД, краткому описанию которых будет посвящено дальнейшее изложение. Очевидно, что широкому промышленному внедрению этих конструкций должна предшествовать стадия полупромышленных испытаний и отладки.

Следует отметить, что все ЭГД могут работать и как смесители, совмещая этот процесс с дроблением. Ряд типов дробилок допускает совмещение в них путем введения небольших конструктивных дополнений, кроме дробления, и процесса флотации.

В описании не рассматривается очевидность того, что отдельные дробильные агрегаты конструктивно могут быть выполнены и совмещенными. В этом случае они заключаются в один общий корпус с несколькими электродами и общим загрузочным устройством.

Различные типы ЭГД классифицируются нами по ряду основных признаков:

1) По конструктивному размещению положительного электрода (отрицательным электродом является почти всегда корпус самой дробилки); это размещение может быть верхним, боковым или нижним.

2) По способу загрузки (подачи размельчаемого материала), которая может быть верхней, боковой и даже нижней.

3) По назначению, которое может быть различным в зависимости от того, какой материал на них измельчается, так как ЭГД могут предназначаться для дробления или измельчения:

а) твердых непроводящих материалов типа камня, цемента, фарфора, руды и т. п.;

б) твердых, хрупких проводящих материалов типа твердых сплавов, карбидов и т. п.;

в) мягких волокнистых, а также эластичных материалов типа бумаги, древесины, торфа, резины и т. п.

Обычный способ электрогидравлического дробления совершенно непригоден для твердых хрупких металлов или их сплавов, так как металл вызовет появление короткого замыкания электродов, и процесс дробления вообще не возникнет.

То же самое относится и к дроблению волокнистых материалов, где обычный способ будет мало эффективен.

Для этих случаев нами разработаны новые способы дробления, и поэтому следующим классифицирующим признаком типов дробилок будет:

4) По способу дробления, который может быть различным в зависимости от рода материала и осуществляться:

а) методом так называемого «внутреннего удара» — наиболее целесообразным для дробления и измельчения материалов первой группы предыдущего пункта;

б) методом так называемого «внешнего удара» и методом «совместного дробления» — наиболее целесообразными для дробления и измельчения материалов второй группы предыдущего пункта;

в) методами так называемой «воздушной кавитации» и «пузырьковой кумуляции» — наиболее пригодными для дробления и измельчения материалов третьей группы предыдущего пункта.

В настоящей работе ввиду малого ее объема будут рассмотрены только метод дробления «внутренним ударом» и конструкции, основанные на его применении для практических целей.

Все электрогидравлические дробилки, основанные на указанном выше способе дробления, условно разделяются нами на:

1) щебеночные;
2) песчаные;
3) коллоидные;
4) выборочные;
5) порционные.

Дальнейшее изложение будет исходить из этого классифицирующего признака; все остальные признаки будут либо указываться в тексте, либо вытекать из конструкции данного варианта ЭГД.

2. Типы электрогидравлических дробилок

Щебеночные дробилки (ЭГДЩ)

Щебеночные дробилки предназначаются для крупного помола на щебень.

Во избежание зависания загружаемого материала в корпусе дробилки диаметр наибольших кусков его должен быть в 2—4 раза меньше диаметра входного отверстия дробилки.

Опыт показал, что наиболее рациональная максимальная крупность выдаваемого дробилкой материала не должна превышать 25—35 *мм*.

Конструктивно ЭГДЩ могут выполняться с верхним или боковым электродом, с верхней или боковой загрузкой материала.

Один из вариантов дробилок этого типа (рис. 3) имеет боковой электрод и верхнюю подачу материала.

В щебеночных ЭГД транспортировка раздробленного материала из приемного бункера может осуществляться силою течения воды и другими способами.

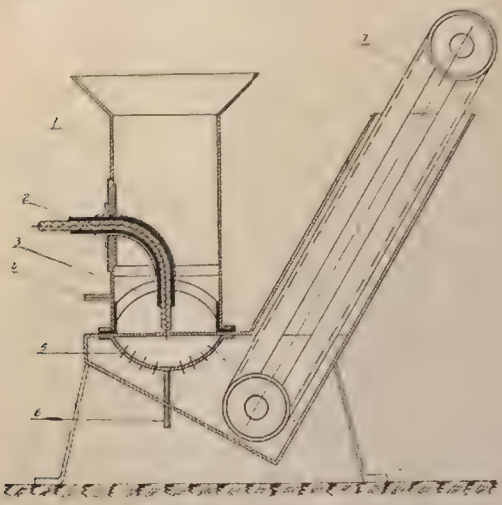


Рис. 3. Щебеночная дробилка (ЭГДЩ):

1—корпус дробилки; *2*—центральный электрод с боковым расположением; *3*—токопроводы; *4*—штуцер для подвода основной массы воды; *5*—полусферическое днище дробилки с отверстиями; *6*—штуцер для подвода воды в зону дробления; *7*—ковшовый элеватор для транспортировки измельченного материала.

Использование гидротранспорта для удаления крупного щебня мало рационально, так как вызывает большой расход воды. Более рациональным является применение ковшового элеватора, так как расход воды при этом снижается до минимума.

Основная масса воды поступает через штуцер *4*, однако для «освежения» воды в зоне дробления, а также на случай дробления материалов типа мела и т. п., дающих даже при крупном дроблении очень много мелких фракций, предусмотрен подвод воды и непосредственно в зону дробления через штуцер *6*.

Сменное полусферическое днище дробилки 5 имеет сетку калиброванных отверстий, задающих верхний предел крупности дробления материала. Сменой днищ с разными диаметрами выходных отверстий можно легко изменять среднюю крупность помола.

Раздробленный материал, пройдя через отверстия в днище, скатывается по уклону бункера днища, откуда непрерывно выдается наружу портей 7.

Дробилка должна быть всегда заполнена водой, уровень которой должен находиться возможно ниже (желательно на уровне нижней части верхнего приемного корпуса — воронки).

Песчаные дробилки (ЭГДП)

Песчаные дробилки предназначаются для дробления материалов на песок фракций не крупнее 1,0—8 *мм*.

Крупность фракций задается, как и в щебеночных дробилках, диаметром выходных отверстий полусферического днища.

Транспортирование раздробленного материала из корпуса дробилки может быть принудительным или гидравлическим.

Конструктивно ЭГДП могут выполняться с верхним, нижним или боковым электродом и иметь как верхнюю, так и боковую загрузки.

Допустима также и компоновка нескольких агрегатов в один, с размещением в общем корпусе нескольких электродов.

Один из вариантов дробилок этого типа (рис. 4) имеет боковой электрод и верхнюю подачу материала. Удаление раздробленного материала осуществляется гидротранспортом.

В песчаных дробилках гидротранспорт материала, в случае наличия достаточного количества воды, становится иногда более целесообразным по сравнению с транспортированием ковшовым элеватором.

Непрерывно загружаемый в воронку *2* материал разрушается в зоне дробления, затем сквозь отверстия решетчатого днища *5* проваливается в приемный бункер *6* и через патрубок удаляется наружу на рассев и классификацию или непосредственно на использование.

Основная масса воды поступает через штуцер *8*. Вода в зону дробления подается через штуцер *7*.

Коаксиальный электрод *3* образует с днищем *5* рабочий искровой промежуток; второй полюс тока через токопроводы *4* подается непосредственно на днище.

Дробилка наполняется водой, непрерывно поддерживаемой на уровне нижней части приемной воронки.

На рис. 5 показан второй вариант дробилки этого типа. Дробилка имеет нижний электрод и верхнюю загрузку материала. Как и первый вариант, она предназначается для дробления на песок.

Материал через воронку *2* непрерывно поступает в корпус *1* и, разрушаясь в зоне дробления, действием самих электрогидравличе-

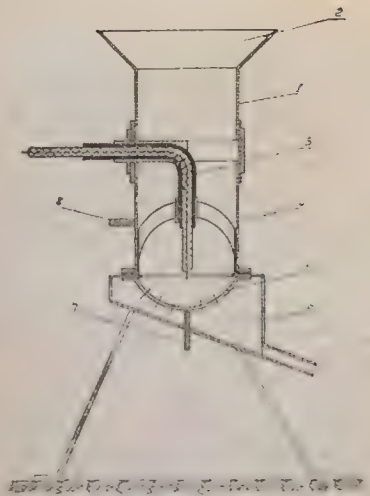


Рис. 4. Песчаная дробилка (ЭГДП):

1—корпус дробилки; *2*—загрузочная [illegible]; *3*—электрод; *4*—токопроводы; *5*—днище дробилки; *6*—приемный бункер с лотком; *7*—штуцер для подвода воды в зону дробления; *8*—штуцер для подвода основной массы воды.

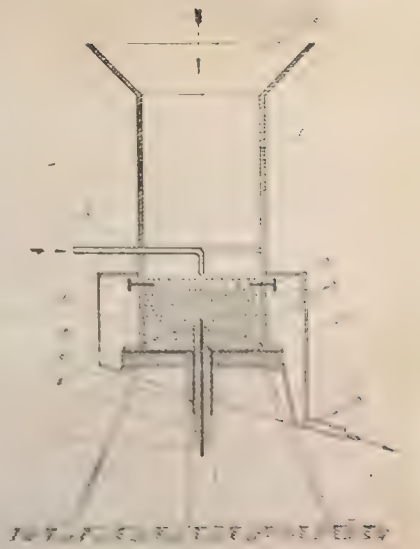


Рис. 5. Вариант песчаной дробилки:

1—корпус дробилки; *2*—загрузочная воронка; *3*—фиксаторы; *4*—отверстия в корпусе дробилки; *5*—приемный бункер; *6*—лоток; *7*—центральный электрод с нижним расположением; *8*—[illegible]; *9*—[illegible] труба электрода; *10*—днище дробилки; *11*—[illegible]; *12*—трубопровод для подвода воды.

сти мере и с меньшей степени течением воды, выбрасывается через калиброванные отверстия *4* в боковых стенках дробилки в приемный бункер *5*, откуда по трубе *6* гидротранспортом выталкивается наружу.

Коаксиальный центральный электрод *7* с изоляцией *8* проходит сквозь днище дробилки *10*, выполненное из изолирующего материала. Днище покрыто подушкой *11* из текстолита, винипласта или найлона.

Электрод *7* образует со стенками дробилки через фиксаторы *3* рабочий искровой промежуток.

Токопровод к стенкам дробилки осуществляется от коаксиальной трубки *9* центрального электрода.

Вода в дробилку подается прямо в зону дробления, сверху, по трубопроводу *12*.

Такие дробилки при дроблении гранита (крепостью 12–14 по Протодьяконову) от кусков 50–100 *мм* до песка не крупнее 3 *мм* расходуют 6–7 *квт-час* на тонну раздробленного продукта.

Коллоидные дробилки (ЭГДК)

Дробилки этого типа могут измельчать материалы на фракции от нескольких микрон или долей микрона до 1–2 *мм*.

Толкость измельчения задается скоростью восходящего потока воды, регулируемого в самых широких пределах.

Загруженный материал должен иметь такую крупность, чтобы он не мог зависать и заклиниваться в цилиндре дробилки.

Коллоидные ЭГД конструктивно могут выполняться с верхним, боковым и нижним размещением электрода и иметь как верхнюю, так и боковую загрузку. Совмещение агрегатов в один также вполне допустимо.

П е р в ы й в а р и а н т дробилок этого типа (рис. 6) имеет нижний электрод и верхнюю подачу материала.

Раздробленный материал выносится из зоны дробления водой, поступающей в штуцер *9* по кольцевому каналу через отверстия в стенках, и водой, подаваемой по трубопроводу *13* непосредственно в зону дробления. Затем раздробленный материал поднимается водой и через отверстия *14* поступает в классификатор *3*, где и разделяется по крупности скоростью восходящего потока.

Далее раздробленный материал через отверстия *4* классификатора поступает в приемный бункер *5*, откуда по лотку *6* выдается наружу.

Коаксиальный центральный электрод *10* образует рабочий искровой промежуток с фиксаторами *12*, выступающими из корпуса дробилки. Ток к корпусу подается от второго полюса коаксиального электрода *11*.

Ввиду большого проходного сечения классификатора скорость восходящего потока в нем может быть очень малой, и, следова-

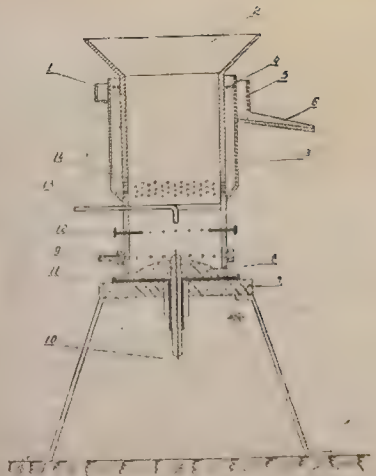


Рис. 6. Коллоидная дробилка (ЭГДК):

1—корпус дробилки; 2—[illegible] [illegible]тор; 4—сливные отверстия [illegible]; 5—[illegible]; 6—лоток; 7—[illegible] дробилки; 8—[illegible]; 9—[illegible] [illegible] излом для подвода воды; 10—[illegible] [illegible]; 11—второй полюс коаксиального электрода; 12—[illegible]; 13—[illegible] бопровод для подачи воды в зону дробления; 14—[illegible] [illegible]пусе дробилки.

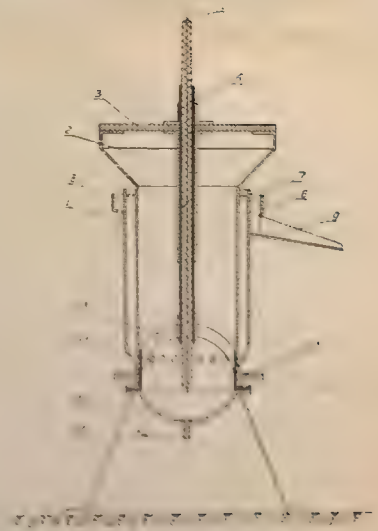


Рис. 7. [illegible]

[illegible] 2—[illegible] [illegible]; 3—[illegible] [illegible]; 4—[illegible] [illegible]; 5—[illegible] [illegible]; 6—[illegible] [illegible]; 7—[illegible] [illegible]; 8—[illegible] [illegible] [illegible] в дробилку; 11—[illegible] [illegible]; 12—[illegible] дробилки; 13—[illegible] [illegible]; 14—[illegible] [illegible] [illegible] дробилки.

тельно, толщина измельчения материала в дробилке этого типа может быть очень большой.

Второй вариант дробилок (рис. 7) этого типа имеет верхний электрод и верхнюю загрузку.

Как и предыдущий, имея большое проходное сечение классификатора, он может быть использован для сверхтонкого измельчения материалов.

Крупность загружаемого материала, как уже указывалось выше, может быть любой, лишь бы материал не зависал в корпусе дробилки.

В этом варианте основная масса воды в дробилку подается по штуцерам *10*, а вода в зону дробления поступает через штуцер *11*, мимо раздробленного материала осуществляется через отверстия *14* в классификатор *6*, где находящимся потоком воды материал классифицируется на фракции по крупности загрузки, затем он через отверстия *7* поступает в приемный бункер *8* и по лотку *9* выдается наружу для использования или дальнейшей классификации, например в серии отстойников или фильтров.

Коаксиальный центральный электрод *4* укреплен сверху дробилки на изолирующей планке *3*.

Второй полюс тока *5* через токопроводы *13* подается на днище дробилки *12*.

Третий вариант дробилок этого типа (рис. 8) имеет верхний электрод, верхнюю загрузку и боковой выносной сменный классификатор.

Как и предыдущие, этот вариант предназначен для тонкого и сверхтонкого измельчения, но ввиду наличия сменного классификатора допускает работу в очень большом диапазоне крупностей. Меняя сечение трубы сменного классификатора, можно при небольшом расходе воды в очень широком диапазоне менять скорость восходящего потока, а следовательно, и крупность измельчения.

Этот вариант дробилок практически может выдавать при любой тонине помола пульпу с очень малым содержанием воды, что иногда имеет весьма существенное значение.

Материал, непрерывно загружаемый через воронку *2*, размельчается в зоне дробления и через отверстия *11* выносится водой в сменный классификатор *8*. Отсюда через приемник *6* материал в виде пульпы по трубе выдается наружу.

Основная масса воды поступает через штуцер *13*, расположенный против выходных отверстий *11*, а через штуцер *12* — в зону дробления.

Коаксиальный центральный электрод *3* с изоляцией закреплен в приемной воронке на изолирующей планке *5* и образует со сферическим днищем дробилки *10* рабочий искровой промежуток *14*.

Ток к днищу подводится от второго полюса *4* коаксиального электрода через токоподводы *9*.

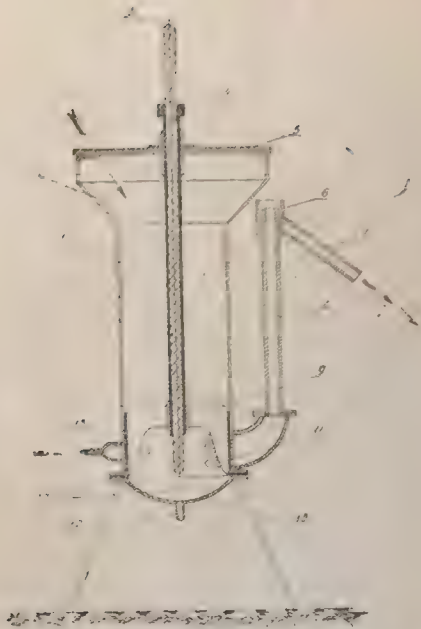


Рис. 8. Вариант коллоидной дробилки:

1—корпус дробилки; *2*—загрузочная воронка; *3*—центральный электрод; *4*—второй полюс—электрод; *5*—изолирующая планка; *6*—приемник; *7*—сливной патрубок; *8*—сменный классификатор; *9*—токопроводы; *10*—днище дробилки; *11*—отверстия в корпусе дробилки; *12*—штуцер подвода воды в зону дробления; *13*—штуцер подвода основной массы воды в дробилку; *14*—искровой промежуток.

Дробилки этого типа применяются для своевременного «выбора» крупных кусков материала, скапливающегося в процессе гидротранспортирования его.

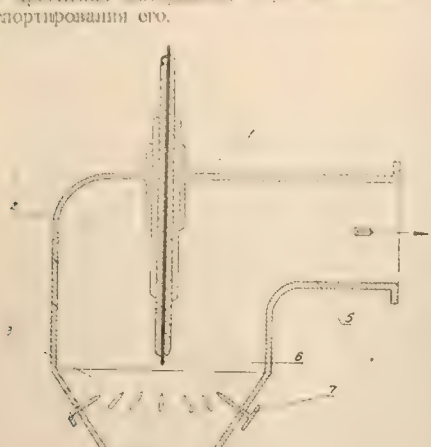


Рис. 9. Выборочная дробилка:

1—корпус дробилки, включаемый в общий трубопровод; *2*—камера дробилки; *3*—расширенная часть трубопровода; *4*—входная часть дробилки; *5*—выходная часть дробилки; *6*—центральный электрод; *7*—фиксаторы.

При гидротранспортировке, например гравийной массы из карьера или грунта землесосом, в составе пульпы попадаются крупные камни (галька), либо выходящие за заданный стандарт крупности, либо представляющие опасность для насосов.

Выборочная ЭГД, включенная в пульпопровод до насоса, гарантирует его работу от попадания в него камней, могущих вызвать

сто из стрж. Эта же дробилка может гарантировать заданный верхний предел крупности материала, проходящего по пульпопроводу.

Один из вариантов дробилки этого типа (рис. 9) имеет верхний электрод и нижнюю подачу материала.

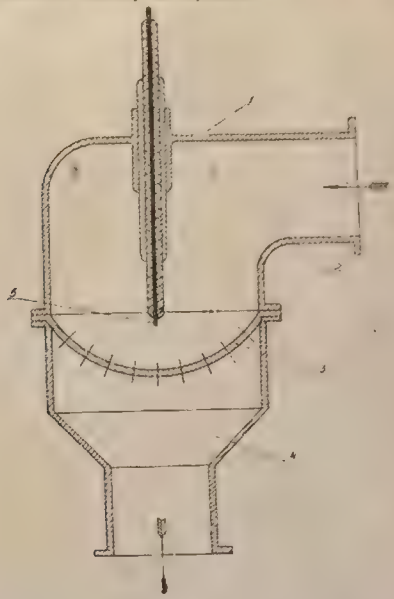


Рис. 10. Вариант выборочной дробилки:

1—корпус дробилки, включаемый в общий пульпопровод; *2*—входное отверстие дробилки; *3*—решетчатое днище дробилки; *4*—выходное отверстие дробилки; *5*—центральный электрод.

Пульпа, содержащая крупные куски камня, поступает вместе с водой снизу по трубопроводу *4*. Он имеет резкое расширение — камеру *2*, в нижней части которой *3* за счет резкого перепада скорости зависает весь крупный каменный материал, подлежащий дроблению, в то время как остальной материал уносится потоком воды в трубопровод *5*.

Взвешенная крупная фракций непрерывно дробится на куски до тех пор, пока крупность полученных после дробления фракций

[illegible] 2. Как только та[illegible] по трубопроводу 5 к месту назначения.

[illegible] 6 [illegible] 7 рабочий искровой промежуток.

[illegible] — [illegible]ным электродом.

[illegible] скоростью [illegible] трубопроводов и [illegible] дробления, т. е. в конечном [illegible] тем же способом — скоростью потока.

На рис. 10 [illegible] этого типа с верхним электродом и [illegible]. Он [illegible] для тех же целей, что и первый вариант, но предполагает более мелкое измельчение — либо на мелкий щебень, либо на крупный песок.

Материал поступает в дробилку по трубопроводу 2 и на сменном решетчатом днище 3 дробится до заданной фракции, проходя затем через отверстия в днище в трубопровод 4.

Центральный электрод 5 образует с днищем 3 и корпусом дробилки искровой промежуток.

Порционные дробилки (ЭГДЛ)

Дробилки этого типа предназначаются для быстрого заданного измельчения различных лабораторных проб весом от нескольких граммов до нескольких десятков килограммов.

Поскольку корпус дробилки может быть изготовлен из любого материала, то возможность засорения пробы нежелательными примесями полностью исключается.

а) Большая лабораторная дробилка (БЛД) предназначена для измельчения лабораторных проб весом до 50 *кг* на фракции, задаваемые диаметром отверстий сменного днища, но не менее чем 1—2 *мм* в поперечнике.

Конструктивно дробилки этого типа целесообразно выполнять с верхним электродом и верхней загрузкой материала. На рис. 11 показан вариант такой дробилки.

Материал, загружаемый через приемную воронку 2, либо сразу или по мере его измельчения, разрушаясь, проваливается через отверстия в днище и падает на дно бункера 3. Когда весь материал раздроблен (и это легко установить по времени или путем периодического измельчения дробилки из бункера), измельченному материалу дают отстояться, сливают воду, сушат и подвергают его необходимым исследованиям.

Коаксиальный центральный электрод дробилки 5, закрепленный на изолирующей планке 10, образует с днищем 6 рабочий искровой промежуток 7.

Ток к днищу подается по [illegible] 11 [illegible] трубке коаксиального центрального электрода к токопроводам 4 и от них через распределительное кольцо 8 на днище.

Корпус дробилки 1 вставляется в бункер 3 и свободно висит в нем на приваренных к корпусу выступах 9.

Для безопасности пользования корпус дробилки, как всегда, заземлен.

Необходимо учитывать, что при электрогидравлическом дроблении многие элементы переходят в воду в виде растворимых соединений, что не может не повлиять на результаты анализа.

В частности, из различных горных пород в воду переходят (иногда в количестве до 90—98%) почти все элементы периодической системы. В опытах обнаружено выделение Mn, Ni, Co, Ti, V, Cr, Zr, Be, Cu, Pb, Ga, La, Sr, Ba, Li, Y, Sc Se, Sn и многих других элементов.

Кроме того, следует иметь в виду, что при электрогидравлическом дроблении состав воды, в которой происходит дробление, претерпевает значительные изменения; так, например, количество растворенных соединений азота за счет азота воздуха, растворенного в воде, возрастает в 50—80 раз, значительно меняется pH воды, появляются перекисные соединения и др. Все это не может не сказаться на химическом составе продуктов, подвергающихся дроблению.

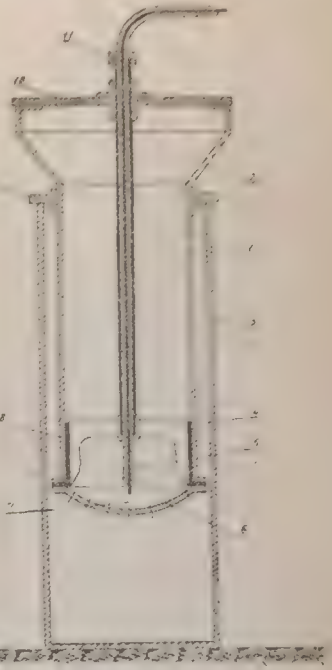


Рис. 11. Большая лабораторная дробилка (БЛД):

1—корпус дробилки; *2*—загрузочная воронка; *3*—бункер; *4*—токопроводы; *5*—центральный электрод; *6*—решетчатое днище дробилки; *7*—искровой промежуток; *8*—распределительное кольцо токопровода; *9*—выступы на корпусе дробилки; *10*—изолирующая планка; *11*—контакт второго полюса электрода.

Например, опытами установлено, что при электрогидравлическом дроблении уголь теряет серу в виде сероводорода и серной кислоты, образующейся в воде, и многое другое.

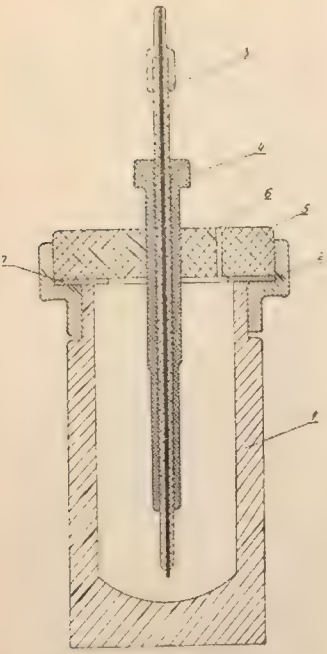


Рис. 12. Малая лабораторная дробилка (МЛД):

1—корпус-стакан дробилки; *2*—крышка; *3*—центральный электрод; *4*—изолирующая трубка электрода; *5*—изолирующая вставка крышки; *6*—отверстие в крышке; *7* уплотнительное кольцо.

б) *Малая лабораторная дробилка (МЛД)* предназначена для тонкого и сверхтонкого измельчения небольших лабораторных проб весом от долей грамма до нескольких сот граммов, но может осуществлять и грубое измельчение проб. Объем стакана дробилки можно варьировать от 5 до 5000 *см*^{3} в зависимости от назначения дробилки.

Крупность загружаемых в дробилку кусков не должна превышать 20—30 *мм*. Крупность выдаваемого материала зависит при заданной энергии импульса только от времени измельчения и подбирается опытным путем. Практически тонина помола может быть любой. Дробилка может повышать измельчение даже таких материалов, которые уже заданы в микронной крупности.

Дробилки этого типа наиболее целесообразно выполнять с верхним электродом, но, конечно, возможны и любые другие варианты.

На рис. 12 показан вариант такой дробилки.

Материал заданного веса или объема загружается в корпус-стакан *1*, дробилка заливается определенным количеством воды или другой жидкости до уровня не более чем на 20—30 *мм* ниже верхнего края стакана, в дробилку вставляется вмонтированный в крышку *2* центральный электрод *3*, крышка закрепляется и дробилка включается в схему питания.

Крышка имеет изолирующую вставку 5, в которую на резьбе ввинчена изолирующая же трубочка 4, служащая для регулирования длины искры, со вставленным в нее электродом.

Электрод 3 выполнен из куска внутренней части одножильного телевизионного кабеля с полиэтиленовой изоляцией. Электрод плотно посажен в отверстие трубочки 4 и имеет наверху приспособление для подсоединения его к питающей установке.

Второй полюс тока подается на корпус дробилки.

Рабочий искровой промежуток образуется между нижним концом центрального электрода и сферическим днищем стакана корпуса дробилки.

При большом числе импульсов, поданных на дробилку, если не было специального охлаждения, можно отметить довольно значительное (до 60–80°) нагревание воды и корпуса. Поэтому крышка дробилки имеет отверстие 6 для свободного выхода расширяющегося воздуха или образующихся газов и паров.

После окончания процесса измельчения крышка дробилки отвинчивается и измельченный материал вместе с водой выливается в лабораторный стакан для последующего исследования.

3. Конструктивные особенности электрогидравлических дробилок

Основным конструктивным элементом ЭГД всех типов является коаксиальный центральный электрод с его изоляцией и системой токоподводов к днищу. Схема центрального электрода с верхним расположением приведена на рис. 13, а общий вид системы центрального электрода — на рис. 14.

Металлический центральный стержень 1 электрода выполняется из латуни или бериллиевой бронзы. В верхней своей части стержень переходит в гибкий канатик 2. Диаметр стержня выбирается в зависимости от мощности питающей силовой установки и принятого режима дробления.

Для случая наиболее мощной из рекомендуемых в настоящей статье силовых установок ($P = 180$ *квт*) при $F = 50$ *гц* расчет определяет диаметр трубчатого стержня электрода из латуни или из бериллиевой бронзы, равным 36,5 *мм*, с конструктивной толщиной стенки трубки не менее 3–5 *мм*.

Для всех других мощностей и режимов диаметр электрода будет соответственно меньше.

Нижний конец силового электрода выполняется в виде небольшой тарелочки 3.

Изоляция центрального электрода 4 изготовляется из эластичного диэлектрика. Для опытных ЭГД она может выполняться, например, из вакуумной эластичной резины. Для установки на 180 *квт* может быть использована вакуумная резина, наружный диаметр которой равен 35–40 *мм*, а внутренний — 9–12 *мм*.

Для быстрой замены в случае разрушения изоляция выполняется составной, из двух кусков, верхнего — более длинного (не-

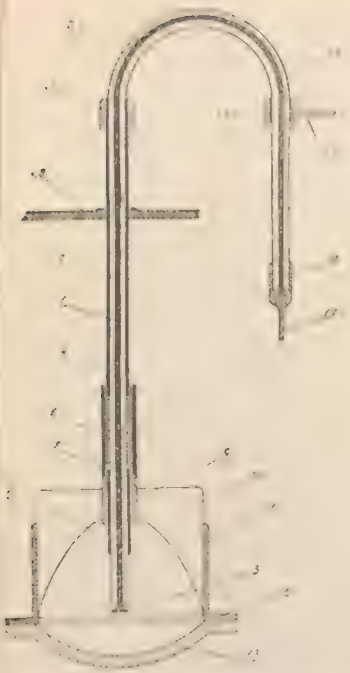


Рис. 13. Система центрального коаксиального электрода:

1—центральный стержень—[illegible] электрод; *2*—гибкий медный канатик; *3*—[illegible] конец стержня электрода; *4* и *5*—изоляция центрального стержня электрода; *6*—полиэтиленовая втулка; *7*—латунная [illegible]; *8*—[illegible]; *9*—[illegible] втулка; *10*—крылья токопроводов; *11* и *12*—токораспределительное кольцо; *13*—днище дробилки; *14*, *16* и *18*—переходные втулки; *15*—коаксиальная оплетка; *17* и *19*—контакты токоприемников; *20*—изолирующая планка.

Рис. 14. [illegible]

[illegible] куска) 4 и нижнего — более крупного куска 5, который и приходится заменять, так как разрушается только нижняя его часть, находящаяся около изоляционного корпуса конца центрального электрода.

Соединение обоих кусков, которые изолированы полиэтиленовой втулкой 6, в которую вставляются обе соединяемые части.

Вся втулка расположена внутри латунной трубки 7, одновременно являющейся токопроводом второго полюса. Изоляция посажена в трубке с небольшим трением.

Устранение продольных перемещений изоляции 4 внутри трубки 8 обеспечивает резиновая прокладка, которая, сжимаясь при сборке втулки, закрепляет ее.

Как показал опыт, резиновая изоляция является не совершенным видом изоляции, так как резиновый шланг довольно быстро разрушается разрядами. Значительно более стойкой является полиэтиленовая изоляция, а также изоляция из капрона или найлона — очень важных и прочных диэлектриков.

Недостаточная стойкость изоляции конца центрального электрода является существенным препятствием в работе электрогидравлических дробилок, подлежащей разрешению.

Как показала практика, причиной разрушения является не действие самих электрогидравлических ударов, но в основном служит термическое и химическое воздействие физико-химических явлений разрядов, предшествующих основному разряду. Однако исследовательская работа по изучению и устранению этой причины еще не закончена.

Латунная трубка 7 токопровода в нижней части плотно входит в резьбу латунной втулки 9, к которой приварены латунные крылья токопроводов 10, в свою очередь приваренные к опорным концам 11 латунного распределительного кольца 12. Нижняя часть кольца облужена и контактирует с также облуженной верхней частью кольцевого обода полусферического днища дробилки 13.

В верхней части на латунную трубку 7 навинчена переходная втулка 14, осуществляющая переход токопровода трубки в гибкую медную коаксиальную оплетку (чулок) 15, закрепляющуюся подобной же втулкой 16 с контактом 17 токоприемника второго полюса.

Медный гибкий канатик 2 центрального электрода закрепляется втулкой 18 с контактом 19 токоприемника.

Конструкция электрода внизу фиксируется крыльями 10 токопроводов, а наверху поддерживается плитой 20, выполненной из текстолита и закрепленной выше приемной воронки дробилки.

Корпус различных типов электрогидравлических дробилок целесообразнее всего изготовлять из цельнотянутых газовых труб с толщиной стенки не менее 6—8 мм.

Полусферические днища дробилок выполняются литыми или штампованными из 6—20 мм стали. Отверстия в днищах необхо-

димого диаметра, если они предусмотрены конструкцией, сверлятся возможно плотнее друг к другу.

Днища же для щебеночных ЭГД следует выполнять из кольца с приваренными к нему выпуклыми по форме днища стальными прутьями толщиной 8—12 мм, образующими сетку квадратных отверстий грохота-днища.

В качестве загрузочных используются уже существующие устройства.

Необходимо, чтобы уровень жидкости, заполняющей корпус дробилки, был возможно выше. Высокий уровень, обеспечивая гидравлический подпор, является «гидравлической пробкой» для процессов электрогидравлического дробления и повышает их к. п. д. Эту же роль играет и постоянное заполнение всего объема дробилки разрушаемым материалом. Опытами установлено, что недостаточно загруженная дробилка работает менее производительно и имеет более низкий к. п. д.

Если в качестве рабочей жидкости вместо воды будет применена какая-либо другая жидкость, то можно ожидать появления самых разнообразных форм физического и химического воздействия на нее со стороны возникающего в ней электрогидравлического эффекта.

Опыты в различных жидкостях показали, что, например, некоторые органические жидкости обугливаются или осмоляются. В других жидкостях наблюдаются такие явления как ускоренное протекание химических реакций, повышение активности катализаторов, ускорение кристаллизации, выпадение различных осадков, появление сложных полимеров и многое другое.

III. СИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Питание ЭГД в зависимости от их назначения и производительности следует осуществлять от специально спроектированных силовых установок, наиболее целесообразных для данного конкретного случая. Ниже рассматривается ряд электрических схем таких установок и рекомендуются конкретные случаи их использования.

1. Силовая установка с использованием простейшей кенотронной схемы

Электрическая схема силовой установки питания этого типа (рис. 15) состоит из зарядного и разрядного контуров (последний выделен на чертеже жирной линией).

Зарядный контур схемы, как, впрочем, и всех других схем, не имеет никакого отношения к самому явлению электрогидравлического эффекта и никаким образом не влияет на его протекание в разрядном контуре схемы.

Электрический к. п. д. зарядного контура схемы весьма низок, так как режим заряда конденсаторов осуществляется в ней пульсирующими по величине напряжением и током. Этот недостаток остается в силе и при использовании 4-кенотронной мостовой схемы, а поэтому общий электрический к. п. д. такой схемы очень низок, находится в пределах 20 - 40%, и не может быть выше 50%.

Введением в схему различных регуляторов тока или напряжения можно несколько поднять общий к. п. д. и довести его до 60—70%.

Для получения более высокого общего к. п. д. необходимо использовать другие схемы.

Работа схемы протекает следующим образом. Как только напряжение на конденсаторе C возрастает до того значения, на которое установлен регулируемый формирующий промежуток $ФП$ разрядного контура, происходит его пробой, и все напряжение импульсно, ударом, подается на рабочий искровой промежуток $РП$, находящийся в жидкости внутри пробойника, что вызывает его пробой.

В [illegible],
осуществляющий разрушение материала.

[illegible] мощностью пи-
тающего трансформатора.

[illegible]

$$A = \frac{CU^2}{2},$$

где A — энергия импульса, *вт · сек*;

C — емкость конденсатора, *ф*;

U — напряжение, *в*.

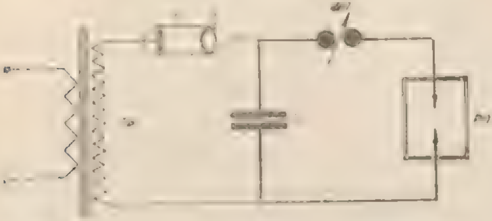


Рис. 1[illegible] установки:

ТР—пита[illegible]; *R*—[illegible]; *С*—конденсатор; *ФП*—[illegible]; *РП*—рабочий искровой промежуток.

Поскольку [illegible] амплитуду напряжения, то работа [illegible], кроме ранее указанных, [illegible]

Для [illegible] необходимо:

1) либо вводить дутье;

2) [illegible] в атмосферу нейтрального слабо ионизируемого газа;

3) либо [illegible] газа;

4) [illegible] *ФП* [illegible] вакуума;

5) [illegible] *ФП* в [illegible] жидкость.

Эта схема [illegible] рекомендуется нами для [illegible] исследований, а также [illegible] лабораторных дробилок БЛД и МЛД.

На рис. 16 [illegible] МЛД, смонтированной [illegible] на одном столе.

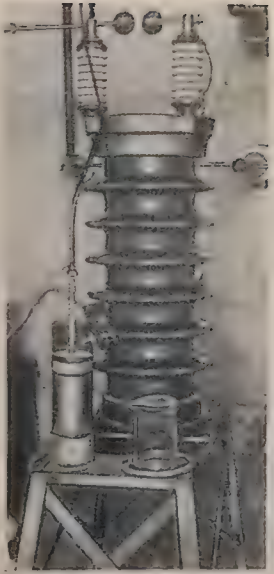


Рис. 16. Внешний вид установки МИД, смонтированной вместе с конденсатором и разрядником.

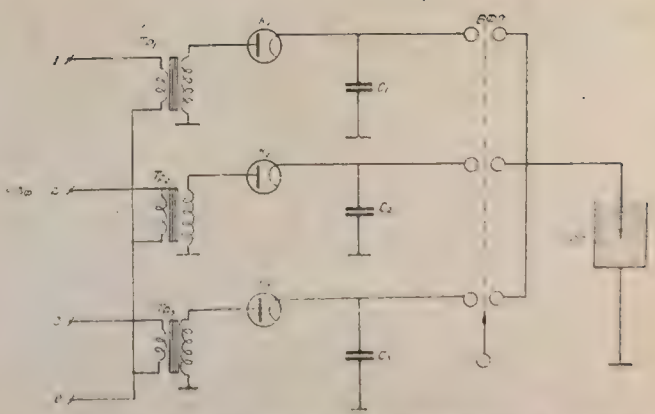


Рис. 17. Вариант электрической схемы питания электроимпульсной установки с тремя питающими трансформаторами.

TP_1, TP_2, TP_3—питающие трансформаторы; K_1, K_2, K_3—выпрямители; C_1, C_2, C_3—конденсаторы; *ВФП*—вращающийся формирующий промежуток; *РП*—рабочий искровой промежуток.

Для увеличения общей мощности установки при использовании простейшей схемы иногда может быть целесообразным создание питающей установки, собранной из трех однофазных трансформаторов TP_1, TP_2, TP_3 (рис. 17), первичные цепи которых соединены звездой или треугольником и питаются от трехфазной сети. Напряжение с их вторичных обмоток подается на отдельные конденсаторы (C_1, C_2, C_3), которые работают через вращающийся формирующий промежуток *ВФП* на один общий рабочий промежуток *РП* в жидкости.

Такая схема позволяет более равномерно нагружать питающую сеть.

Естественно, что путь повышения общей мощности установки использованием более мощного питающего трансформатора остается в силе.

Для установок, собранных по простейшей схеме, можно использовать рентгеновские трансформаторы типа Д-110-К4 на 5 *кат*, либо трансформаторы от электрофильтров типа АФ-18 на 18 *кат*.

2. Силовая установка с фильтровой емкостью и индуктивной заряжающей цепью рабочей емкости

Электрическая силовая установка питания этого типа (рис. 18) позволяет получать практически любую частоту чередования импульсов при работе на небольших (до 0,1 *мкф*) емкостях и имеет общий электрический к. п. д. порядка 80—85%.

Это достигается тем, что фильтровая емкость C_1 работает в режиме неполной разрядки (10—20%), а рабочая емкость C_2 заряжается через индуктивную цепь-дроссель L с малым активным сопротивлением. Фильтровая емкость C_1 через дроссель L, вращающийся промежуток BP_1 и кенотрон K_2 заряжает малую рабочую емкость C_2, причем емкость C_1 превышает емкость C_2 не менее чем в 15—20 раз.

Таким образом, зарядка емкости C_2 через индуктивность L происходит в течение одного полупериода в колебательном режиме.

Малая рабочая емкость C_2 в разрядном контуре схемы разряжается на рабочий искровой промежуток *РП* через вращающийся формирующий промежуток BP_2.

Вращающийся промежуток BP_1 по существу представляет собою коммутатор, позволяющий в определенные моменты времени замыкать зарядную цепь конденсатора C_2. Время замыкания зарядной цепи определяется длиной неподвижных секторных дуг (между которыми движется шарик) и скоростью движения шарика, т. е. числом оборотов мотора, легко регулируемых в широком диапазоне обычными средствами.

Так как диски обоих разрядников BP_1 и BP_2 сидят на одном валу, то частоту чередования разрядов можно также варьировать в очень широких пределах, в максимуме определяемых мощностью

питающего трансформатора. При непрерывной работе схемы емкость C_1 не должна разряжаться более чем на 20%.

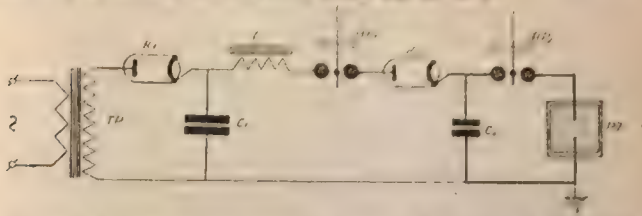


Рис. 18. Схема питания электрогидравлической установки с фильтровой емкостью и индуктивной зарядной цепью рабочего конденсатора

TP—высоковольтный трансформатор; K_1, K_2 - кенотроны; *L*—индуктивность—дроссель; BP_1, BP_2—вращающиеся шаровые разрядники; C_1, C_2—конденсаторы.

В этой схеме в качестве питающих могут быть использованы трансформаторы на 35—50 *кв*, так как она удваивает напряжение. Схема может подсоединяться и непосредственно к высоковольтной сети.

3. Резонансные силовые установки

Различные резонансные схемы представляют для целей электрогидравлики особый интерес по двум основным признакам: во-первых, их общий электрический к. п. д. очень высок и может достигать 95—98%, и, во-вторых, при их использовании достигается автоматическое значительное повышение рабочего напряжения.

Таким образом, используя стандартные 35-киловольтные силовые трансформаторы различных мощностей, можно не только получать значительную выходную мощность, но и одновременно повышать рабочее напряжение до 90—100 *кв*.

Достаточная компактность существующих конструктивно хорошо отработанных стандартных силовых 35-киловольтных трансформаторов позволяет применять их для целей электрогидравлики.

Проблема расчета и создания необходимых реакторов не встречает особых трудностей, так как сконструировать и выполнить в натуре катушку с железом или без железа, погруженную в масло и рассчитанную на импульсное напряжение в 100 *кв*, незатруднительно.

Синхронизатор может быть изготовлен в любой мастерской.

а) Однофазная схема

Электрическая схема однофазной резонансной силовой установки питания (рис. 19) может иметь общий электрический к. п. д.,

достигающий 95—98%, и позволяет получать стабильную по времени требуемую по желанию частоту чередования разрядов, принимающую равную либо одинарной, либо двукратной частоте питающего тока, т. е. 50 и 100 *гц* соответственно при питании током промышленной частоты.

Условие резонанса известно из выражения

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}},$$

где ω — частота вынуждающей э. д. с., *гц*;
L — индуктивность контура, *гн*;
C — емкость контура, *ф*.

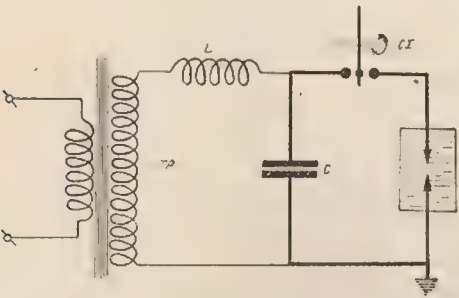


Рис. 19. Схема однофазной резонансной силовой установки питания:

ТР—питающий трансформатор; *L*—индуктивность—реактор; *С*—конденсатор; *РП*—рабочий искровой промежуток; *СХ*—синхронизатор—формирующий промежуток.

Отсюда при заданных параметрах питающего тока легко определить необходимые значения L и C, имея в виду, что величина C (для всех случаев работы ЭГД с производительностью до 20 *г* в час) должна лежать в пределах 0,1—0,5 *мкф* при частоте чередования разрядов до 50—100 *гц* на фазу и рабочем напряжении не выше 100 *кв*.

Легко подсчитывается также и минимальная мощность питающего трансформатора, равная

$$W = 1{,}1 \cdot A \cdot f, \text{ при } \eta = 90\%,$$

где W — мощность питающего трансформатора, *квт*;
A — энергия единичного импульса, *квт · сек*;

f — частота чередования разрядов на *РП*, *гц*;
η — общий электрический к. п. д. схемы.

Применение схемы равноценно при мощностях, лежащих в пределах 15—30 *квт*, так как при меньших мощностях габариты реактора становятся чересчур громоздкими, а при больших возникает значительная несимметрия [illegible].

Реактор *L* схемы выполняется в виде [illegible], намотанной без железа (или с железом), рассчитанной на напряжение в 100 *кв* и погруженной в масло.

Конденсатор *C* схемы выполняется с [illegible] емкостью и должен иметь достаточно [illegible].

В разрядный контур схемы вводится так называемый синхронизатор, представляющий собою обычный [illegible], между шарами которого вращается [illegible] с [illegible] ным на нем металлическим шариком, [illegible] срабатывание *ФП* при проходе между его шарами.

Срабатывание это осуществляется в любой момент [illegible] напряжения при прохождении шарика на [illegible] синхронным моторчиком с фазорегулятором.

В целях лучшего контроля синхронизации в схему целесообразно ввести осциллограф типа ЭО-7.

б) Трехфазная схема

Электрическая схема трехфазной [illegible] силовой установки питания (рис. 20) [illegible] трехфазного повышающего трансформатора, каждая обмотка на высокой стороне которого работает как однофазная резонансная схема на один общий для всех рабочий искровой промежуток. Естественно, что они могут работать и на три самостоятельных рабочих искровых промежутка.

Синхронизатор в этой схеме также общий. В нем под углом в 120° расположены три формирующих промежутка, между шарами которых последовательно проходит один замыкающий шарик, сидящий на диске, вращающемся от небольшого синхронного моторчика с фазорегулятором. Использование осциллографа типа ЭО-7 для контроля синхронизации пробоя также целесообразно и здесь.

Схема позволяет получать частоту чередования разрядов, равную трехкратной или шестикратной частоте питающего тока, т. е. 150 *гц* или 300 *гц* соответственно, при работе на промышленной частоте.

Эта схема рекомендуется нами для работы на больших мощностях силовой установки порядка 50 *квт* и выше с использованием в ней стандартных силовых трансформаторов типа ТМ на 100, 180, 320, 560 *квт* со вторичным напряжением 35 *кв*.

По расчетным данным, используя стандартный силовой трансформатор ТМ-180/35, получим при η. и. д. $= 90\%$ и $\cos\varphi = 0{,}84$

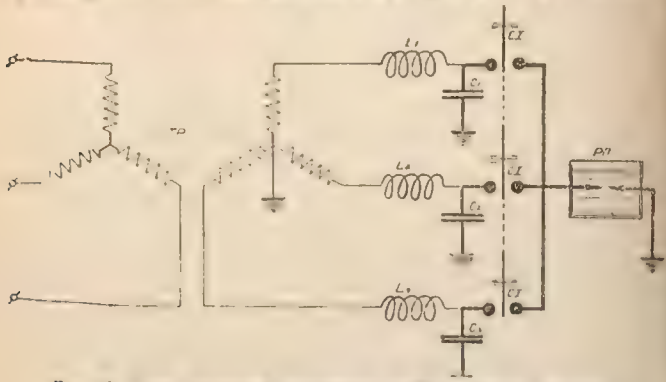


Рис. 20. Схема трехфазной резонансной силовой установки питания:
TP—трансформатор; L_1, L_2, L_3 реакторы; *C*—конденсаторы; *CX*—синхронизатор—формирующий промежуток; *РП*—рабочий искровой промежуток.

полезную мощность $P_п = 135$ *квт* при $U = 90$ *кв*, что вполне обеспечит работу ЭГД, которая при загрузке гранитного камня диаметром кусков 250—300 *мм* будет выдавать в час не менее 20 *т* песка фракций не крупнее 4 *мм* в поперечнике.

Лев Александрович Юткин

Электрогидравлическое дробление

Редактор инж. *Л. Н. Бриллиантов* Техн. редактор *М. М. Кубнева*

Ленинградский Дом научно-технической пропаганды (ЛДНТП), Невский пр., 58

М-65310 Тип. ЛДНТП Зак. 120 Тир. 6700 Объем 2,5 п.л. Уч.-изд. л. 2,48 15-IV-59 г.

Общество по распространению
политических и научных знаний РСФСР

ЛДНТП
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ДОМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОПАГАНДЫ

Л. Л. ЮТКИН

Электро-гидравлическое дробление

Часть II

Ленинград—1960

Общество по распространению политических и научных знаний РСФСР
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ДОМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОПАГАНДЫ

Л. А. ЮТКИН

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ДРОБЛЕНИЕ

Часть II

(стенограмма лекции, прочитанной в ЛДНТП для инженерно-технических работников предприятий и учреждений строительной промышленности)

Серия — *Строительная промышленность*

Ленинград
1960

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть II

Введение 3

I. Физическая сущность некоторых процессов электрогидравлического разрушения материалов 4

1. Действующие факторы разрушения . . . . . —

2. Искажение полости кавитации . . . . . .

II. Дробление хрупких проводящих материалов . . . 8

1. Метод «совместного дробления» . . . . . —

2. Метод «внешнего удара» 12

Дробилка «с параллельным разрядом» . . . . . .

Дробилка «с перпендикулярным разрядом» . . . 14

III. Дробление пластических проводящих материалов . . . 16

IV. Метод коллоидного обогащения некоторых материалов . 21

V. Дробление упругих и волокнистых материалов . . . 25

1. Метод «воздушной кавитации» . . . . . —

2. Метод «пузырьковой кумуляции» 29

VI. Получение эмульсий и деэмульгирование 33

1. Эмульсия типа жидкость + жидкость . . . . . —

2. Эмульсия типа жидкость + твердое тело 37

3. Эмульсия типа жидкость + газ . . . . . —

4. Деэмульгирование 38

VII. Дробление металлургических шлаков 40

1. Дробление шлаков . . . . . —

2. Выделение металла из шлаков 43

VIII. Дробление кимберлитов 44

IX. Специальные методы разрушения 45

1. Метод теплового взрыва . . . . . —

2. Электропневматика 47

Литература

Лев Александрович Юткин

Электрогидравлическое дробление

Редактор *Л. Н. Бриллиантов* Техн. редактор *М. М. Кубнева*

Ленинградский Дом научно-технической пропаганды (ЛДНТП), Невский пр., 58

М-24109 Тип. ЛДНТП Зак. 333 Тир. 6200 Объем 3,125 п.л. Уч.-изд. л. 2,5 1-II-60 г.

ВВЕДЕНИЕ

В первой части настоящей работы были рассмотрены электрогидравлические дробилки (ЭГД), основанные на способе дробления и измельчения так называемым «внутренним ударом», т. е. таким электрогидравлическим ударом, который возникает внутри какого-либо объема жидкости, заполненного материалом, однако такой удар может возникать и вне этого объема — в среде жидкости или материалом.

Как уже упоминалось, этот способ дробления иногда оказывается неприемлемым или менее эффективным, чем способы дробления, излагаемые ниже.

Основные положения, определяющие свойства, назначение, поведение и форму всех элементов конструкций ЭГД и технологию работы на них, конспективно изложенные в первой части, остаются в силе и здесь.

Однако ряд процессов, протекающих при использовании рассматриваемых ниже способов дробления и измельчения, будет недостаточно ясен без краткого изложения физической сущности их.

I. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

1. Действующие факторы разрушения

Как уже было отмечено ранее, разрушение материалов, осуществляемое электрогидравлическим ударом, является следствием действия нескольких комплексных факторов:

а) высоких и сверхвысоких гидравлических ударных давлений;
б) мощных кавитационных процессов;
в) мощного ультразвукового излучения;
г) резонансных явлений.

По нашим представлениям гидравлические ударные давления воздействуют на объекты любых размеров, например негабариты. Кавитационные процессы могут эффективно воздействовать на объекты, сравнимые по своим размерам с размерами возникающих кавитационных полостей, т. е. практически на куски материала до 100—200 *мм* в поперечнике. Ультразвуковое излучение оказывает воздействие на частицы, сравнимые с длиной волны соответствующего излучения, но так как спектр его необычайно широк, то этого рода воздействие по существу охватывает все остальные размеры частиц материала, интенсивно диспергируя их в степени, необходимой для всех случаев практики.

Резонансные процессы тесно связаны со звуковым и ультразвуковым родом воздействия, имеют самостоятельное значение в общем процессе разрушения, но еще далеко недостаточно изучены нами.

2. Искажение полости кавитации

Образующаяся при каждом разряде полость кавитации, при условии осуществления разряда в значительном объеме жидкости, имеет обычно совершенно правильную форму, своеобразие которой обусловлено спецификой самого процесса ее образования.

Рядом несложных приемов можно разнообразно и резко влиять на форму этой полости и, искажая ее, тем самым широко варьировать поведение возникающего при ее захлопывании «кавитационного» гидравлического удара. С этой целью применяются различные «отражатели».

Отражатель принципиально представляет собою прямую или специальной формы упругую пластину из резины, текстолита, полиэтилена, капрона или найлона — материалов, стойкость которых к разрушающему действию электрогидравлических ударов возрастает в этом ряду слева направо.

Различным образом ориентированная относительно разряда пластина отражателя вызывает многообразные действия, сводящиеся в конечном счете к искажению возникшей кавитационной полости, внешне проявляющемуся в своеобразной «фокусировке» или в отражении механических усилий, возникающих при электрогидравлических ударах.

Очевидно, что при этом отражается сфокусированная в ультразвуковое излучение электрогидравлического эффекта, что дает повод в дальнейшем рассматривать этот метод как новый метод фокусирования ультразвука кумуляцией.

Некоторые процессы, происходящие при возникновении и развитии кавитационных полостей при различных условиях их возникновения, схематически показаны на рис. 1.

Кавитационная полость *в*, расположенная в свободном объеме жидкости между электродами *а*, имеет резко очерченную границу *б* (*схема 1*, рис. 1).

Если вблизи электродов поместить пластинчатый отражатель *д* из эластичного материала, то полость кавитации *в* искажается, и ее граница *б* займет положение *г*, в соответствии со *схемой 2*.

При дальнейшем приближении отражателя *д* к электродам *а* в положение, показанное на *схеме 3*, искажение полости кавитации *в* будет еще более резко выраженным. Граница полости перейдет из положения *б* в положение $г_2$.

Если отражателю *д* придать специальную форму, например в соответствии со *схемой 4*, то искажение полости *в* станет максимальным, она из положения *б* перейдет в положение *г*.

Если отражатель *д* разместить в соответствии со *схемой 5* перпендикулярно к линии электродов *а*, то хотя искажение ее и будет относительно небольшим (из положения *б* в положение *г*), но при захлопывании полости она дает особенно резко выраженную кумулятивную струю, направленную в сторону отражателя.

При расположении электродов *а* вблизи свободной поверхности жидкости *ж* (в соответствии со *схемой 6*) также произойдет искажение полости кавитации. Кроме того, что граница ее перейдет из положения *б* в положение *г*, может произойти еще: либо выброс тонкого столба жидкости *е* при сравнительно глубоком погружении, либо выброс жидкости в виде «куста» вплоть до выброса всей «чашки» жидкости над электродами.

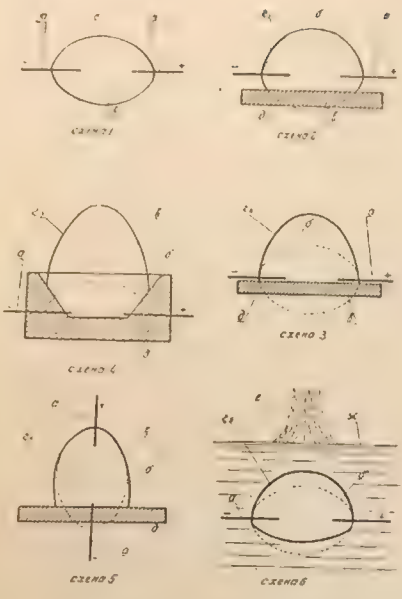


Рис. 1. Влияние отражателей на форму кавитационных полостей:

а—электроды; *б*—естественное положение границы кавитационной полости; *в*—кавитационная полость; *г*—граница искаженной кавитационной полости; *д*—пластина отражателя; *е*—выброшенный столб жидкости; *ж*—поверхность жидкости.

Случай, приведенный на *схеме 3*, представляет большой интерес в отношении развивающихся в этом варианте действующих усилий. Легко показать, что отражатель *О* в момент возникновения основного удара испытывает удар силы, действующей на него в направлении от полюсов. При захлопывании полюсов результирующая сил снова создает удар по отражателю, направленный в ту же сторону, что и в первом случае. Таким образом, возникает очень интересное явление, когда действие и отражение противодействия создают усилие, направленное в одну и ту же сторону. Усилие это протекает не одновременно, а в два приема. Использование указанного явления может найти применение в специальных устройствах, например в двигателях.

Изложенное здесь сведения должны быть использованы конструкторами и технологами при конструировании и в процессе эксплуатации различных электромагнитных устройств.

II. ДРОБЛЕНИЕ ХРУПКИХ ПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Дробление хрупких проводящих материалов осуществить методом «внутреннего удара» практически совершенно невозможно, так как такие материалы, окружая со всех сторон рабочий искровой промежуток дробилки, закорачивают его таким образом, что разряда не возникает (ток идет через металл), а следовательно, не возникает и электрогидравлического эффекта с его разрушающими воздействиями.

Однако для случая, когда проводящий материал (например, металл) достаточно хрупок, но дробление его обычными средствами весьма сложно и неэкономично, такой материал можно дробить методом «внутреннего удара» на обычных ЭГД до крупности, равной крупности щебня или песка. Для этих целей нами предлагаются специальные методы.

1. Метод «совместного дробления»

Опыт показал, что если к какому-либо вязкому, нехрупкому материалу, плохо поддающемуся действию электрогидравлических ударов (например, диабазу), добавить в количестве 5—15% подлежащий дроблению хрупкий проводящий материал (например, карбид вольфрама) и такую смесь подвергать электрогидравлическому дроблению до стадии щебня или песка на обычных ЭГД (описанных в первой части данной работы), то явлений короткого замыкания можно практически избежать.

Несмотря на то, что в этом случае расход энергии на дробление всей смеси по сравнению с ее расходом на дробление основного материала увеличивается в 5—10 раз, тем не менее для ряда случаев, такое дробление может оказаться вполне рентабельным сравнительно с существующими механическими методами дробления подобных материалов.

Не следует забывать, что ЭГД и для этого случая будут конструктивно проще и дешевле существующих устройств, а главное в отличие от валков и т. п. практически не будут изнашиваться.

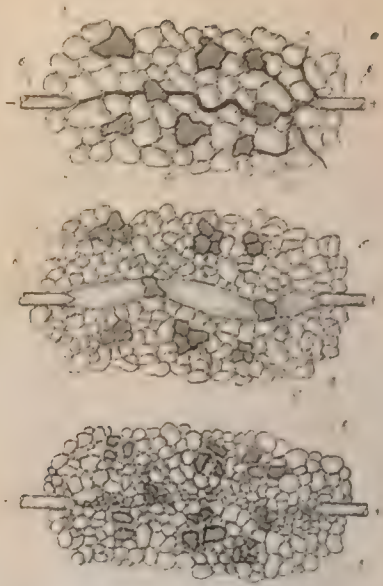


Рис. 2. Развитие процесса при совместном дроблении:

1—канал разряда и стримеры, исходящие из положительного электрода; *2*—проводящие включения, расположенные на пути канала разряда,—„внутренние" частицы; *3*—проводящие включения, расположенные вне пути канала разряда,—„внешние" частицы; *4*—частицы непроводящего материала; *5*—разрушенная после основного удара „внешняя" проводящая частица; *6*—электроды; *7*—кавитационная полость; *8*—разрушенные после кавитационного удара „внутренние" проводящие частицы.

При использовании метода «совместного дробления» основной материал будет так же дробиться, как и проводящая «добавка», а следовательно, после дробления их надлежит каким-либо способом разделить. Это не представит затруднений в силу разницы удельных весов обоих компонентов дробления.

Мы полагаем, что процесс при осуществлении метода «совместного дробления» происходит в основном за счет взаимных столкновений частиц непроводящего материала с частицы проводящего под действием электрогидравлических ударов, возникающих от разрядов в промежутках между проводящими частицами. При этом, если основной электрогидравлический удар дробит прежде всего расположенные вдали от канала разряда «внешние» частицы проводящего материала, то кавитационный электрогидравлический удар дробит «внутренние» частицы, через которые ранее проходил канал разряда. Происходящий процесс схематически показан на рис. 2.

Стриммеры, растущие от положительного электрода в объеме жидкости, дорастают до отрицательного электрода и образуют искровой канал *1 (схема а)*. При этом стриммеры проходят через несколько частиц проводящего материала *2*. Основная масса материала *4* окружает со всех сторон проводящие включения как расположенные по линии канала разряда, так и находящиеся вдали от него *3*.

Следующая фаза процесса показана на схеме *б* — здесь вокруг канала разряда уже образовалась кавитационная полость *7*, соединяющая электроды *6* и проводящие частицы, лежавшие ранее на пути канала.

Основной гидравлический удар, возникший при этом, оставил целыми частицы, лежащие на пути канала разряда, но раздробил частицы, расположенные вне его. Одновременно дробится и весь остальной материал.

Следующая фаза процесса, показанная на схеме *в*, отображает момент, когда кавитационная полость захлопнулась. При этом раздробились частицы *8*, лежавшие ранее на пути канала разряда.

В связи с рассмотрением процессов, происходящих при осуществлении метода «совместного дробления», следует показать также и причину того, почему разряд, возникающий в объеме, содержащем в виде сравнительно крупных частиц разрозненные проводящие включения, возникает не обязательно по кратчайшему, но по такому пути, на котором при всех прочих равных условиях находится наименьшее число проводящих частиц.

На рис. 3 показан случай, когда в пространстве между электродами, наполненном жидкостью, находится некоторое количество относительно крупных проводящих частиц.

В соответствии с принципом получения сверхдлинных разрядов для прорастания стриммеров на сверхдлинные расстояния необходимо, чтобы активная поверхность положительного электрода *4* была возможно меньшей, а активная поверхность отрицательного электрода *5* — возможно большей.

В электрогидравлических устройствах, как и в случае рассматриваемом нами, площади обоих электродов стабильны и организованы в соответствии с изложенным принципом. Казалось бы, в рассматриваемом случае искровой разряд должен развиваться не только нормально, но и лучше, так как этому должны были бы «помогать» находящиеся в жидкости проводящие включения. Однако это

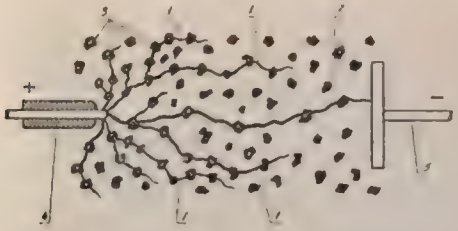


Рис. 3. Развитие пробоя между проводящими частицами, находящимися в жидкости:

1—стриммеры, не доросшие до второго электрода; *2*—стриммер, доросший до второго электрода и превратившийся в канал разряда; *3*—частицы проводящего материала; *4*—положительный электрод; *5*—отрицательный электрод.

совершенно не так: наличие относительно крупных частиц проводящих включений *3* отрицательно влияет на развитие сверхдлинных разрядов в жидкости, резко сокращая их длину.

Это явление объясняется тем, что когда стриммер, растущий в жидкости от положительного электрода (но как поток электронов, двигающийся к нему) дорастет до одной из ближайших частиц проводящего материала, то этот стриммер тем самым «включит» в систему положительного электрода не только самого себя, но и проводящую частицу с совершенно конкретной площадью ее поверхности. Этим фактически будет вызвано увеличение активной поверхности положительного электрода на величину площади поверхности этой «подсоединенной» частицы. Дорастание стриммера до других частиц, вместе с каждой из них, будет увеличивать эту площадь на величину площади очередной частицы до тех пор, пока «суммарная» активная поверхность положительного электрода не станет настолько большой, что дальнейший рост стриммеров при заданном напряжении на электродах станет невозможным. Для

прорастания стримеров на еще большие расстояния станет необходимым дальнейшее увеличение напряжения.

На рис. 3 показан ряд стримеров, часть из которых *1* не доросла до отрицательного электрода, и только один стример *2* дорос, образовав собою путь для канала искрового разряда.

Таким образом, для того чтобы и в этом случае разряд был возможно большей длины, необходимо либо уменьшить размеры частиц (но тогда отрицательное влияние роста активной поверхности может возрасти за счет увеличения их общего количества), либо повысить напряжение.

Поскольку при осуществлении данного метода мы вынуждены нагружаем в дробилку весьма крупные по размерам частицы, то естественным является только один путь — путь повышения напряжения, а это приводит к резкому увеличению расхода энергии, что и наблюдается на практике.

Как указывалось выше, при разрушении хрупких проводящих материалов методом «соприкосновения дробления», осложняющим обстоятельством является необходимость последующего разделения друг от друга обоих контактов дробления.

Поэтому нами разработан и другой способ дробления таких материалов, основанный на методе «внешнего удара», полностью исключающий последующую обработку материала и выдающий его без посторонних примесей.

2. Метод «внешнего удара»

Сущность метода «внешнего удара» сводится к тому, что электрогидравлический удар осуществляется в жидкости, но не внутри объема, заполненного проводящим материалом, а вне его и на таком расстоянии от материала, чтобы искровой разряд, имея достаточную длину для полного использования энергии данного импульса, был бы расположен возможно ближе к поверхности слоя разрушаемого материала.

Этой цели мы можем достичь двумя путями, в обоих случаях располагая разрушаемый хрупкий проводящий материал тонким слоем на решетчатом дне дробилки. Каждый из этих двух путей дает и свой вариант конструктивного выполнения электрогидравлических дробилок для этих целей.

Дробилка с «параллельным разрядом»

Способ организации разряда в этой дробилке в принципе повторяет *схему 2*, приведенную на рис. 1, с той только разницей, что вместо отражателя в ней будет расположен слой раздробляемого проводящего материала.

Дробилка с «параллельным разрядом» предназначена для дробления хрупких проводящих материалов до стадии щебня или песка, т. е. до любой крупности от 20—30 *мм* и мельче. Крупность помола

в ней, как и в обычных ЭГД, задается диаметром выходных отверстий днища.

Транспортирование раздробленного материала из бункера дробилки может быть как гидравлическим, так и принудительным — с помощью транспортера.

Конструктивно такие дробилки выполняются подобно щебневым и песчаным.

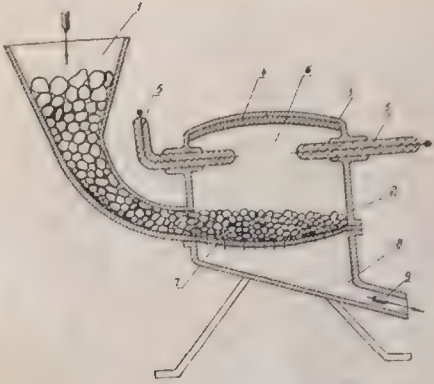


Рис. 4. Электрогидравлическая дробилка для хрупких проводящих материалов с «параллельным разрядом»:

1—загрузочная воронка; *2*—корпус дробилки; *3*—крышка дробилки; *4*—отражатель; *5*—электрод; *6*—рабочий искровой промежуток; *7*—решётчатое дно дробилки; *8*—приемный бункер; *9*—выводной канал.

Один из вариантов дробилок этого типа приведен на рис. 4. Она имеет два верхних изолированных от корпуса электрода, расположенных параллельно слою раздробляемого материала (что определяет ее название), и боковую подачу его. Удаление материала осуществляется гидротранспортом.

Один из электродов дробилки (принимаемый отрицательным) целесообразно соединять электрически с корпусом дробилки и заземлять.

Непрерывно загружаемый в приемную воронку *1* материал поступает (в виде слоя) на днище *7*, имеющее сетку калиброванных отверстий, определяющих верхний предел крупности дробления. Возникающие на электродах *5* разрядника в рабочем искровом про-

межутке *6* электрогидравлические удары фокусируются на материале действием отражателя *4*, выполненного из эластичного диэлектрика и расположенного на нижней части крышки корпуса *3*.

Раздробленный материал поступает в бункер *8*, откуда по каналу *9* выносится наружу водой, непрерывно подаваемой в дробилку.

При работе вода должна заполнять весь корпус дробилки. Искровой разряд в ней должен быть расположен ниже слоя материала на минимальном расстоянии, несколько большем половины длины искры, при обоих изолированных электродах и несколько большем длины искры при заземленном отрицательном электроде. В противном случае с уменьшением расстояния от разряда до материала дробилка может превратиться в вариант с «перпендикулярным разрядом».

Дробилка с «перпендикулярным разрядом»

Способ организации разряда в этой дробилке повторяет *схему 5*, приведенную на рис. 1, но вместо отражателя в ней размещен тон-

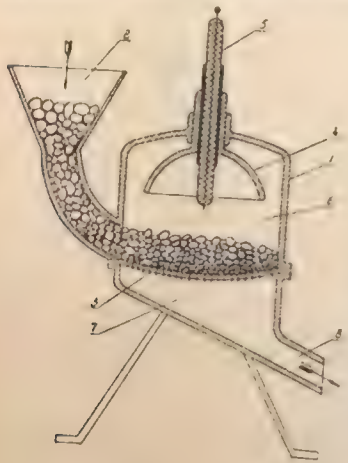


Рис. 5. Электрогидравлическая дробилка для хрупких проводящих материалов с „перпендикулярным разрядом":
1—корпус дробилки; *2*—загрузочная воронка; *3*—решетчатое днище дробилки; *4*—отражатель, регулируемый по высоте; *5*—положительный электрод; *6*—рабочий искровой промежуток; *7*—приемный бункер; *8*—выводной канал.

кий слой раздробляемого материала. Дробилка с «перпендикулярным разрядом» предназначается для тех же целей, что и предыдущая.

Конструкция ее почти аналогична первой, за исключением того, что в ней в качестве отрицательного электрода использован слой проводящего материала, лежащий на металлическом днище.

Схема дробилки приведена на рис. 5.

Материал загружается в приемную воронку *2* и попадает на днище дробилки *3*, имеющее сетку калиброванных отверстий, где и располагается в виде слоя.

Верхний положительный изолированный электрод *5* образует между слоем материала и своим передним концом рабочий искровой промежуток *6*.

В целях усиления и направленности действия электрогидравлических ударов на материал может быть применен фокусирующий отражатель *4*, установленный на корпусе дробилки и регулируемый по высоте в зависимости от необходимости.

Раздробленный материал проваливается через сетку отверстий днища в бункер *7*, откуда по каналу *8* выдается наружу.

Легко допустить, что конструкция дробилки может быть выполнена и с рядом электродов, размещенных в одном удлиненном корпусе с общими удлиненными загрузочным каналом и приемным бункером.

III. ДРОБЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Для дробления и измельчения пластических проводящих материалов, например металлов или их проводящих соединений, нами был разработан особый метод измельчения, позволяющий получать как крупнозернистые порошки этих металлов, так и весьма дисперсные — коллоидные измельчения их.

Сущность метода сводится к тому, что разряды и сопровождающие их электрогидравлические удары возникают в местах контакта макрочастиц измельчаемого материала, погруженного в жидкую среду между электродами.

При этом основной разряд распадается на десятки тысяч отдельных мелких разрядов, имеющих приблизительно одинаковые друг с другом параметры, зависящие в данной жидкости (при стабильных параметрах основного разряда) только от начальной крупности измельчаемого материала и от диаметра ванны или расстояния между электродами.

Для заданных параметров основного разряда дисперсность получаемого материала будет тем выше, чем больше диаметр ванны (или расстояние между электродами) и мельче крупность макрочастиц исходного материала.

С повышением энергии импульса при заданном диаметре ванны и заданной крупности макрочастиц исходного материала дисперсность конечного продукта будет увеличиваться, если возрастание энергии импульса шло за счет повышения напряжения, и уменьшаться, если увеличение энергии импульса шло за счет возрастания емкости контура.

Загрузка в ванну очень мелкого материала может остановить процесс диспергирования при неизменном напряжении, так как оно может оказаться недостаточным для пробоя всех микропромежутков, число которых возрастает при постоянном расстоянии между электродами или заданном диаметре ванны вместе с уменьшением крупности измельчаемого материала.

Другими словами, для каждой крупности загружаемого материала при заданных размерах ванны существует некоторый нижний

предел величины напряжения, ниже которого разряды не будут происходить. Поэтому с повышением крутизны загрузки рабочее напряжение может быть снижено.

Для нормальной работы устройств, основанных на этом способе, необходимо всегда обеспечивать достаточную крутизну фронта импульса.

При рассмотрении процессов, происходящих при осуществлении способа, следует иметь в виду, что к ним должны относятся все

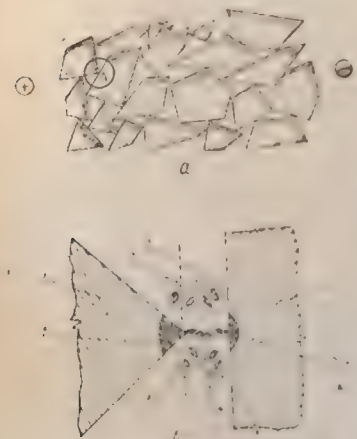


Рис. 6. Развитие процессов при получении коллоидов металлов: *а*—схема контактирования частиц; *б*—схема процессов, возникающих в точке контакта макрочастиц *А*; *1* и *2*—макрочастицы металла, контактирующие между собой через смачивающий их слой жидкости; *3*—пограничный, смачивающий частички слой жидкости; *4*—канал искрового разряда; *5*—лунка, выплавленная в металле разрядом; *6*—микрокапельки металла, выброшенные из лунки в жидкость; *7*—коллоидные частички металла.

те соображения, которые были высказаны ранее при рассмотрении вопроса развития пробоя между проводящими частицами в жидкости (см. рис. 3).

Существо процессов, проходящих в данном случае, схематически приведено на рис. 6.

По нашим представлениям физика происходящих процессов состоит в том, что каждый микрообъем металла, выплавленный каждым микроразрядом, возникающим в точке контакта каждых двух макрочастиц, затем силою теплового взрыва и действием микрокавитационного гидравлического удара выбрасывается в виде микрокапелек в жидкость, в процессе этого перемещения еще более диспергируясь действием мощного ультразвукового излучения, сопровождающего каждый электрогидравлический удар.

На рис. 6, *а* схематически показано, как контактируют между собой макрочастицы *1* исходного материала, а на рис. 6, *б* приведена схема процесса диспергирования в одной из точек контакта *А* двух макрочастиц. Макрочастицы *1* и *2* контактируют в жидкости *3* непосредственно, а через возникающий слой *3* жидкости. Возникающий между частицами разряд *4* показывает в каждой из них

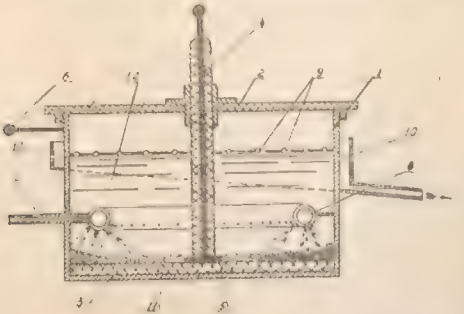


Рис. 7. Устройство для непрерывного получения коллоидов металлов:

1—корпус ванны; *2*—поддерживающая планка; *3*—изолирующее днище—пластина диэлектрика; *4*—положительный электрод; *5*—контактная пластинка положительного электрода; *6*—подвод тока к корпусу—второму электроду; *7*—подвод воды в коллектор; *8*—коллектор с отверстиями для выхода воды; *9*—выпускные отверстия в корпусе; *10*—приемный бункер с выпускным трубопроводом; *11*—слой макрочастиц диспергируемого металла; *12*—объем, заполненный жидкостью.

некоторый объем материала *5*. Выброшенный в виде капелек *6* материал распыляется далее в коллоид *7* действием ультразвука.

Устройства для получения порошков и коллоидов всех металлов или их проводящих соединений, основанные на данном методе, могут выполняться как прерывнодействующими, так и непрерывными, осуществляя диспергирование в любой жидкости, в том числе: воде, спирте, эфире, бензине, парафине и т. п.

При работе в органических жидкостях следует иметь в виду возможность их обугливания действием возникающих в них разрядов. В целях уменьшения обугливания целесообразно работать на более слабых напряжениях с малой энергией импульса.

Один из вариантов устройств, использующих данный способ, (рис. 7), осуществляет диспергирование металлов и других проводящих материалов в непрерывном процессе.

Производительность такого устройства принципиально ничем не ограничена и определяется только его размерами и мощностью питающей установки.

Во время работы устройства можно наблюдать, как при каждом импульсе в нем возникают десятки тысяч микроразрядов и как под действием микроэлектрогидравлических ударов интенсивно перемешиваются частицы материала, контактируя между собой все новыми и новыми участками своей поверхности. С течением времени загруженные в устройство макрочастицы превращаются в правильные шары, постепенно уменьшающиеся в диаметре.

Наиболее ценным свойством способа следует считать возможность получения абсолютно чистых металлических порошков и коллоидов, так как все элементы устройства для его осуществления могут быть выполнены из того же материала, который подлежит измельчению, а в качестве рабочей жидкости может быть использована дистиллированная вода или любая другая химически чистая жидкость.

Устройство выполняется в виде круглой металлической ванны, на дно которой положен диск *3* из изолирующего материала. На диск тонким слоем насыпаются стружки, опилки или грубо измельченные частицы материала *11*. По оси ванны через отверстие поддерживающей планки *2* свободно пропущен электрод *4* в изоляции, имеющий на нижнем конце круглую контактную пластину *5*.

Электрод под действием собственного веса контактирует пластинкой со слоем измельчаемого материала. Вторым отрицательным электродом являются стенки ванны. Через штуцер *7* и распределительное кольцо *8*, снабженное снизу сеткой мелких отверстий, внутрь ванны непрерывно подается жидкость, заполняющая всю ванну и создающая завихрения в нижней ее части для взмучивания образующегося коллоида.

В верхней части ванны, в ее стенках, имеется ряд отверстий *9*, через которые жидкость вместе с образовавшимся и взвешенным в ней коллоидом перетекает в бункер *10*, откуда по лотку поступает на выделение или дальнейшее использование.

В опытах нами была получена дисперсность частиц средней крупностью порядка 0,05 *мк*, но, по-видимому, это еще не является пределом.

Получение частиц крупнее 100—150 *мк* вполне возможно, но исследовательские работы в этом направлении нами не велись.

Расход энергии на получение коллоидов варьирует в зависимости от рода измельчаемого материала (по-видимому, возрастая вместе с его тугоплавкостью) и от степени его измельчения, но в общем относительно невелик и по нашим данным лежит в пределах 100—5000 *квт-ч* на тонну воздушно-сухого коллоидного порошка.

Коллоиды могут быть широко использованы в порошковой металлургии, для получения жаропрочных и жароустойчивых изделий, для утяжеления топливных жидкостей, в качестве припоев, обмазок,

наполнителей, красок и т. п., а также в строительной технике (например, для улучшения показателей прочности бетонов) и для закрепления некоторых грунтов «[illegible]» их путем нагнетания в грунт небольших количеств коллоидных растворов железа и других металлов.

Следует указать, что если в технике получения многокомпонентных металлокерамических сплавов порошковой металлургии чрезвычайно сложным процессом является хорошее смешение отдельных компонентов сплава, то сложность эта полностью отпадает с применением разработанного нами способа «совместного получения» коллоидов, когда заданные весовые соотношения исходных металлов диспергируются совместно в самом процессе этого диспергирования, не только идеально перемешиваясь, но и в значительном количестве образуя между собой микрообъемные сплавы. Питание энергией устройств для получения коллоидов наиболее целесообразно осуществлять от различных силовых установок.

В связи с изложенным выше способом получения коллоидов следует рассмотреть также метод коллоидного обогащения некоторых материалов, в основе которого лежит тот же процесс.

IV. МЕТОД КОЛЛОИДНОГО ОБОГАЩЕНИЯ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ

Метод коллоидного обогащения некоторых материалов предназначен для взаимного разделения, а следовательно, и обогащения некоторых материалов или руд, содержащих проводящие включения (например, сернистые или углеродистые соединения металлов).

При осуществлении этого метода во взвешенное в жидкости — коллоидное состояние — переходит вся проводящая часть материала, которая и может быть удалена, а непроводящая часть остается в ванне. Поскольку ценным материалом может быть как проводящая, так и непроводящая части данного материала, то способ позволяет обогащать любую из них.

Этим способом можно выделить, например, железистые включения, имеющиеся в составе технического электрокорунда, и таким образом обогатить непроводящую часть — корунд или выделить (отделить от пустой породы) проводящую часть руды типа медного колчедана и, следовательно, обогатить ее.

Сущность способа та же, что и предыдущего метода, но при осуществлении устройств для его использования, в целях получения непрерывного процесса обогащения, дно ванны разделения должно быть выполнено подвижным с тем, чтобы медленно двигающийся по нему материал успел полностью потерять свой проводящий компонент и быть выгруженным в бункер, а на его место непрерывно поступал бы свежий, необогащенный материал.

На рис. 8 предлагается один из вариантов подобного устройства. Подлежащий обогащению материал непрерывно подается в загрузочный бункер *2*, откуда равномерным слоем поступает на конвейерную ленту транспортера *6*, выполненную из непроводящего материала. Сверху вдоль ленты по ее середине размещена тонкая и узкая пластина *4* центрального электрода *3*, в силу чего обогащаемый материал в процессе движения его по ленте постоянно контактирует с этой пластиной.

Стенки ванны *1* являются вторым — отрицательным — полюсом тока. Таким образом, некровые разряды распространяются по обеим сторонам от оси конвейерной ленты к бортам удлиненной ванны.

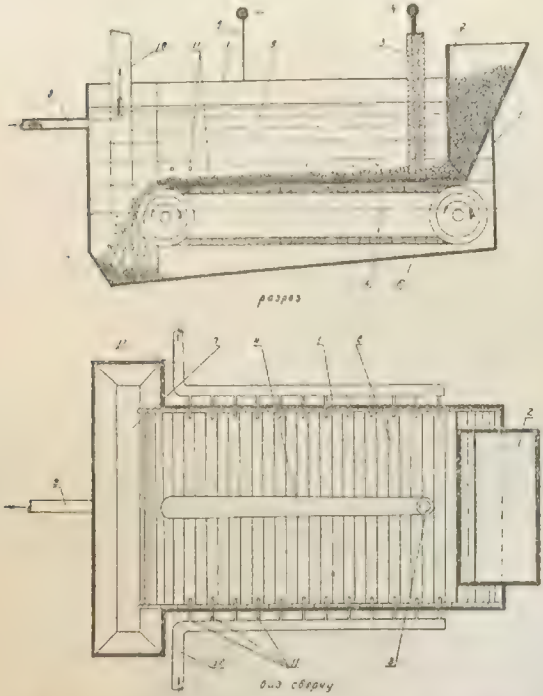


Рис. 8. Устройство для непрерывного коллоидного обогащения материалов:

1 – корпус ванны; *2* – загрузочный бункер; *3* – положительный электрод; *4* – пластины положительного электрода; *5* – отрицательный электрод – корпус ванны; *6* – лента транспортера; *7* – бункер для обогащенного (или обезвреженного) материала; *8* – трубопровод для отвода коллоида; *9* – рабочая жидкость; *10* – элеватор для выгрузки материала; *11* – выпускные отверстия трубопровода коллектора; *12* – коллектор подачи рабочей жидкости.

При соответствующей скорости движения конвейера, в зависимости от мощности питающей силовой установки, происходит полное разделение компонентов материала.

Освобожденный от примесей материал или чистая порода попадает в приемный бункер *7*, откуда элеватором *10* удаляется наружу, а образовавшийся коллоид непрерывно удаляется из ванны по трубопроводу *8*. Убыль жидкости в ванне непрерывно попол-

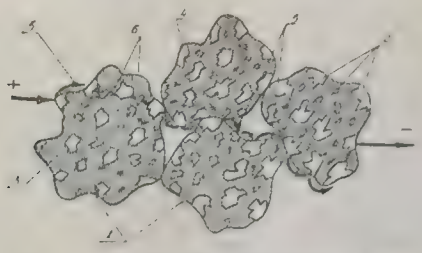


Рис. 9. Схема процессов, происходящих в ванне разделения:

1—контактирующие между собой макрочастицы материала; *2*—проводящие включения, имеющиеся внутри макрочастиц; *3*—непроводящая часть—основная масса макрочастиц; *4*—непосредственный контакт частиц двух проводящих включений в двух различных макрочастицах; *5*—разряды по поверхности макрочастиц; *6*—разряды внутри тела макрочастицы.

няется по трубопроводам *12*, размещенным по бортам ванны, откуда жидкость через отверстия *11* выбрасывается тонкими струями, взмучивающими образующийся коллоид.

Питание аналогичных обогатительных устройств целесообразно осуществлять также от разновидных силовых установок.

На рис. 9 в увеличенном виде приведена схема процессов, происходящих в ванне разделения.

Макрочастицы *1* с проводящими включениями *2* в пустой породе *3* контактируют между собой, причем контактирующие точки могут быть любыми, а не только образованными двумя проводящими частицами.

Поэтому разряды, возникающие между проводящими частицами, могут происходить по трем различным направлениям:

а) между контактирующими частицами *4* (при этом в соответствии с рис. 6 предыдущего раздела образуется основная масса коллоида);

б) между проводящими частицами, расположенными на поверхности макрочастицы *5* (при этом возникает достаточно сильное электрогидравлическое разрушение породы в промежутке между частицами, и образуется некоторое количество коллоида);

в) между проводящими частицами и частицами, расположенными внутри объема самой макрочастицы *6* (такие разряды приводят к раскалыванию последней на более мелкие).

Процессы при разрядах типа *б* и *в* приводят к постепенному разрушению всего объема макрочастицы и все более вскрывают внутренние, ранее закрытые, микровключения проводящего материала.

Материал, подлежащий обогащению, должен загружаться в ванну разделения достаточно измельченным.

По-видимому, способ будет пригоден для обогащения некоторых руд, рассеянных элементов, а также золота и других благородных металлов.

V. ДРОБЛЕНИЕ УПРУГИХ И ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Описанные выше способы дробления и измельчения либо не могут быть вовсе применены, либо не дают существенных результатов при дроблении и измельчении всякого рода вязких и волокнистых материалов, так как эффект дробления таких материалов становится или весьма слабым или неэкономичным. Это объясняется тем, что эластичные и волокнистые материалы при больших концентрациях их в воде образуют густые, малоподвижные субстраты, практически трудно перемешиваемые, и поэтому подача новых порций таких материалов в зону дробления становится затруднительным или невозможным, а разрушение материала происходит лишь в непосредственной близости от разряда. Поэтому для размельчения всякого рода волокнистых и эластичных материалов нами разработаны способы, позволяющие осуществлять: либо одновременное с дроблением интенсивное перемешивание всего объема, занятого жидким субстратом, либо производить дробление в большем активном объеме, либо (при комбинации обоих методов) получать и то и другое одновременно.

Такими способами являются: метод «воздушной кавитации» и метод «пузырьковой кумуляции».

1. Метод «воздушной кавитации»

Сущность метода «воздушной кавитации» сводится к тому, что при осуществлении разряда под относительно небольшим слоем жидкости часть жидкости, лежащая над разрядом, с большой скоростью выбрасывается вверх. Часть жидкости, лежащая под разрядом, не испытывая удерживающих ее сил сцепления со стороны вылетевшего вверх слоя жидкости, движется вниз и увлекает за собою воздух, прилипший к образовавшуюся «чашу». Воздух прорывается в глубь жидкости и интенсивно и бурно перемешивает при этом весь объем жидкости.

Жидкость, вылетевшая вверх, размельчается на отдельные капли и с силой ударяется о различные преграды, если их поставить

на ее пути. Таким образом, все эти действия будут одновременно с перемешиванием интенсивно разрывать на части и измельчать также и те волокнистые материалы, которые были при этом распределены в объеме вылетевшей жидкости.

Метод пригоден для дробления и измельчения всякого рода эластичных и волокнистых материалов типа: бумаги, торфа, асбеста, древесины, тряпья и т. п.

Для уяснения сущности процессов, происходящих при воздушной кавитации, на рис. 10 показана последовательность явлений, сопровождающих разряд, организованный в соответствии со схемами, изображенными на этом рисунке.

На *схеме 1* приведен момент, когда в жидкости между электродами *1* и *2* в искровом промежутке *3* возник искровой разряд и первый — основной гидравлический удар. Зона высоких давлений *4* имеет при этом свою специфическую форму. Жидкость получила огромные ускорения по все стороны от линии разряда.

На *схеме 2* изображен следующий за этим момент, когда часть жидкости, расположенная над разрядом, действием возникших сил оказалась выраженной из общего объема жидкости и в виде крупных брызг *6* устремилась вверх, оставив в жидкости характерное углубление *5* в виде чаши.

Слои жидкости, расположенные под разрядом (т. е. дно чаши 7), продолжают движение вниз.

На *схеме 3* приведен момент, когда продолжающееся движение вниз нижних слоев жидкости увлекает за собой окружающий воздух через углубляющуюся чашу *8*. Вылетевшая вверх часть жидкости *9* интенсивно дробится на мелкие капли. Вход в чашу начинает сжиматься под действием поверхностного натяжения жидкости.

На *схеме 4* приведен момент, когда воздух, двигавшийся вниз, обогнал движение жидкости, уже замедленной свое перемещение, и в виде крупных пузырей *10* прорвался внутрь ее. В жидкости появляются боковые *11* и нижние *12* перемещения, способствующие дальнейшему смыканию горловины чаши. Вылетевшая вверх жидкость продолжает свое движение, все более измельчаясь.

На *схеме 5* показан момент, когда удлиненная чаша захлопнулась, образовав кумулятивный всплеск *16* и волнообразные движения поверхности *15* под влиянием внутренних сил *13* и *14* бурно двигающейся жидкости.

Весь объем сосуда заполнен многочисленными дробящимися на части и всплывающими вверх пузырьками воздуха *17* разной величины. На поверхность жидкости падает попадавшая скорость раздробленная на капли жидкость, вылетевшая ранее из сосуда.

На *схеме 6* представлен момент, когда процесс закончился. Объем жидкости в сосуде густо насыщен воздушными пузырьками средних и мелких размеров. Поверхность жидкости относительно спокойна. Падение капель жидкости сверху прекратилось.

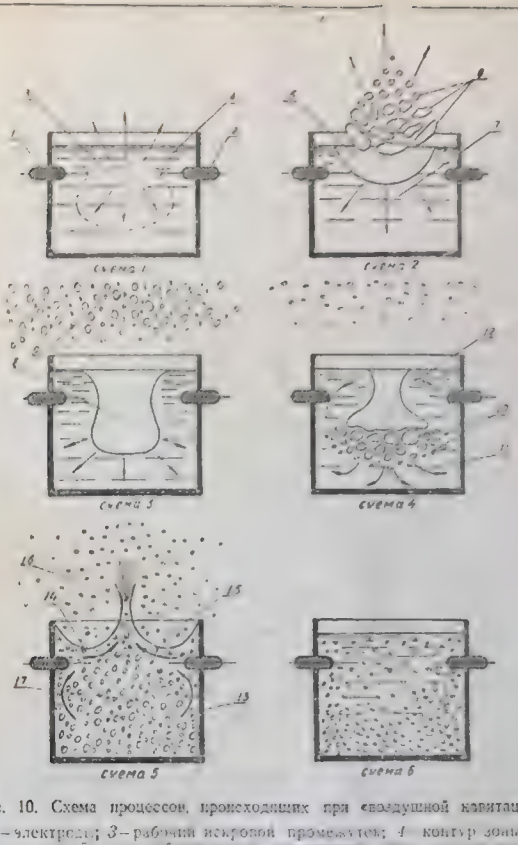


Рис. 10. Схема процессов, происходящих при «воздушной кавитации»:

1 и *2*—электроды; *3*—рабочий искровой промежуток; *4*—контур зоны высоких давлений; *5*—чаша, образовавшая вылетевшей вверх части жидкости; *6*—летящие вверх крупные брызги жидкости; *7*—участки жидкости движущиеся вниз; *8*—углубляющаяся вниз чаша; *9*—летящие вверх дробящиеся капли и брызги жидкости; *10*—прорывающиеся вниз крупные пузыри воздуха; *11*—перемещения жидкости вблизи дна сосуда; *12*—перемещения верхних слоев жидкости; *13*—боковые перемещения жидкости; *14*—перемещения жидкости у поверхности; *15*—колебательные движения поверхности; *16*—кумулятивный всплеск; *17*—дробящиеся и появляющиеся в жидкости пузырьки воздуха.

Со следующим разрядом последовательность процесса, изложенная выше, повторяется.

Один из усовершенствованных вариантов устройства, использующих данный способ, показан на рис. 11. В камеру *1* из трубопровода *2* непрерывно поступают смешанные в заданной пропорции вода и материал, подлежащий измельчению. Выводной канал *3*, закрытый сеткой *4* с калиброванными отверстиями в ней, обеспечивает постоянный уровень жидкости в камере. Разряды возникают между

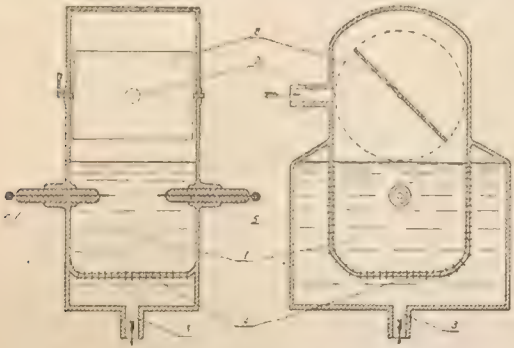


Рис. 11. Устройство для дробления методом «воздушной кавитации»:

1—рабочий объем, заполненный жидкостью; *2*—подача материала и жидкости; *3*—отвод переработанного материала; *4*—сетка отверстий в днище и стенках рабочей камеры; *5*—электроды; *6*—отражающая поверхность.

электродами *5* вблизи от поверхности жидкости, каждый раз выбрасывая некоторую часть ее вверх, где она может ударяться о поворотное препятствие *6*.

Ряд таких камер, соединенных последовательно, может довести материал до необходимой степени измельчения, работая с заданной производительностью, зависящей от мощности источника питания. Наиболее рациональным источником питания подобных устройств будет резонансная силовая установка.

Необходимо отметить, что применение метода «воздушной кавитации» далеко не ограничено сказанным выше.

Метод «воздушной кавитации» может быть, в частности, использован при осуществлении электрогидравлической очистки мелкого литья, которое при этом размещается навалом на сетке, помещенной над разрядом. В состав жидкости вводится какой-либо абразив.

Вылетающая абразивная смесь хорошо [illegible] изделия, попутно переворачивая их.

2. Метод «пузырьковой кумуляции»

Сущность метода «пузырьковой кумуляции» состоит в том, что в жидкость принудительно вводятся пузырьки какого-либо газа или пара, которые в виде полусфер оседают на разрушаемом материале, распределенном в жидкости. Под влиянием сверхвысоких давлений, возникающих в жидкости при электрогидравлических ударах, происходит мгновенное захлопывание таких осевших пузырьков. При захлопывании в силу фокусирующего действия полусфер происходит образование кумулятивных струй жидкости, направленных в сторону материала, и локальное его разрушение. Процесс этот осуществляется весьма интенсивно, охватывая собою во много раз бо́льший активный объем, значительно превышающий объем одной зоны разрушения данного электрогидравлического удара.

На рис. 12 (*схема 1*) показано поведение пузырьков газа, введенных в жидкость, в зависимости от их размера.

Если в жидкость вводить пузырьки какого-либо газа или пара, то среди них, естественно, могут быть как крупные *1*, так и мелкие *2* (*схема 1*). Опыт показывает, что самые мелкие пузырьки *2* практически почти совсем не оседают на материале в виде необходимых нам полусфер *3*, но держатся в жидкости вблизи материала, сохраняя свою шаровидную форму и медленно всплывая. Очень крупные пузырьки *1* совсем не оседают на материале и быстро всплывают на поверхность.

Не осевшие на материале пузырьки не только бесполезны для осуществления процесса измельчения, но и вредны, так как такие пузырьки, захлопываясь при электрогидравлических ударах, непроизводительно поглощают их энергию, снижая среднее значение величины импульса давления в жидкости, и бесполезно отдают ее затем при последующем их расширении. Поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы в жидкости возникали пузырьки только оптимального — среднего размера, хорошо оседающие на материале в виде характерных слегка сплющенных полусфер.

Оптимальный размер пузырьков в данной жидкости зависит от ряда факторов, в том числе: от характера жидкости, от рода газа или пара, наполняющего полость пузырька, от свойств жидкости, от ее температуры, вязкости и т. п.

Подбор оптимальных размеров пузырьков, вводимых в данную жидкость, осуществляется опытным путем, например, регулированием давления подачи газа или пара, вводимого в жидкость через сетчатую трубку с калиброванными отверстиями в ней.

Образование жидкой кумулятивной струи на осевшем пузырьке показано на *схеме 2*, где приведены последовательные стадии

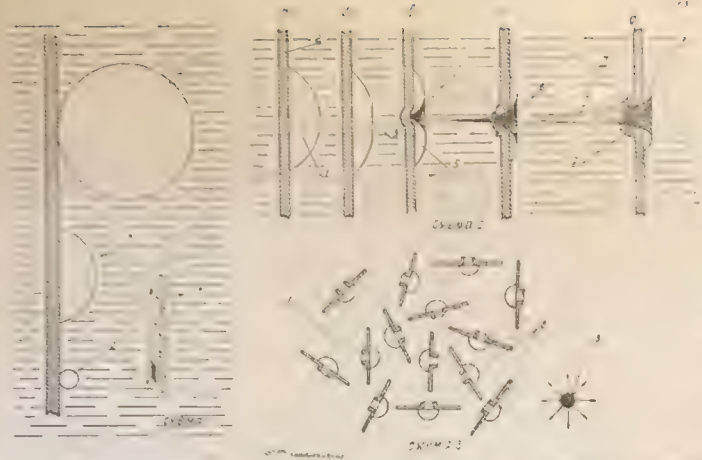


Рис. 12. Схема процессов „пузырькового кумулятивного эффекта":

Схема 1—поведение пузырьков в жидкости в зависимости от их объёма:

1—пузырёк наибольшего объёма; *2*—пузырёк наименьшего объёма; *3*—пузырёк оптимального объёма, образовавший полусферу на материале.

Схема 2—возникновение жидкой кумулятивной струи при захлопывании газового пузырька;

1—осевший пузырёк до начала его сжатия; *2*—материал, на котором осел пузырёк; *3*—появление искажения формы пузырька; *4*—начальная стадия кумулятивной струи; *5*—образование тороидного пузырька; *6*—дальнейшее развитие струи; *7*—кумулятивная струя; *8*—минимальный объём тороидного пузырька; *9*—края пробитого отверстия в материале.

Схема 3—схематическое изображение материала, распределенного в жидкости, с осевшими на нём пузырьками воздуха:

1—материал; *2*—первоначальный вид пузырьков; *3*—эпицентр электрогидравлического удара.

этого процесса. Пузырек *1*, [illegible] на материале *2*, под воздействием высоких давлений, [illegible] от электрогидравлического удара, [illegible] захлопываться, постепенно образуя (*3, 4, 6 и 7*) [illegible] кумулятивную струю, направленную в сторону материала и воздействующую на него.

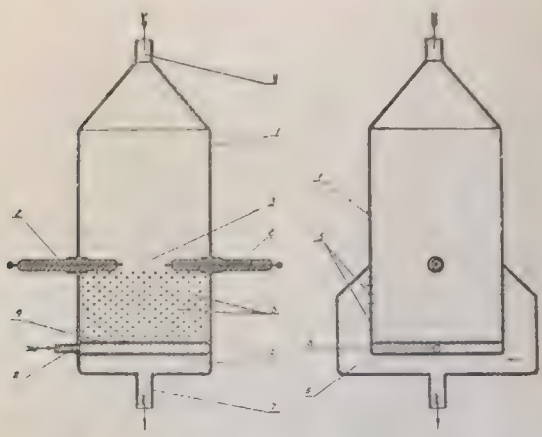


Рис. 13. Устройство для дробления методом «пузырьковой кумуляции»:

1—корпус устройства; *2*—электроды; *3*—рабочий искровой промежуток; *4*—подача материала и воды; *5*—сетка выходных отверстий для материала; *6*—приёмный бункер для обработанного материала; *7*—выводной патрубок; *8*—подвод газа или пара; *9*—выходные отверстия для газа.

Схематическое изображение массы жидкости с распределенным в ней каким-либо пластинчатым материалом, осевшим на нем пузырьками *2* и вызванными ими разрушениями, приведено на *схеме 3*.

Эпицентр электрогидравлического удара *3* может быть расположен при этом где-то далеко в стороне.

Опыт показал, что пузырек воздуха объемом около 0,5 *см*³, будучи расположен под слоем воды толщиною 300—400 *мм*, при возникновении разряда с энергией в 500 *вт-сек* на расстоянии около 150 *мм* от него способен образуемой им кумулятивной струей пробить насквозь стальную пластинку толщиною 2—3 *мм*.

Поскольку растворившиеся после срабатывания воздушные и газовые пузырьки в дальнейшем не могут быть использованы, и, как мы уже указывали, только вредят процессу и его эффективности, следует вводить в жидкость не газ, а пар. При этом существование пузырьков пара только длится ровно столько времени, чтобы пузырек осел, сработал, образовав кумулятивную струю, он мог бы необходимо разрушиться и, растворившись, немедленно конденсироваться бы в жидкости [illegible], без вреда для дальнейшего хода процесса.

Метод «пузырьковой кумуляции» охватывает активным разрушающим воздействием значительный объем жидкости с рассеянными в ней частицами материала и, поэтому, особенно целесообразен для измельчения [illegible] материалов типа целлюлозы, макулатуры, слюды и т. д.

Следует заметить, что поскольку при осуществлении явления «воздушной кавитации» в жидкость прорывается значительный объем воздуха, дробящегося затем на отдельные пузырьки, то при этом неизбежно возникают и все те следствия, которые сопутствуют протеканию изложенного выше явления «пузырьковой кумуляции», осуществляющейся при этом как бы автоматически.

Устройства для измельчения способом «пузырьковой кумуляции» будут аналогичны всем измельчающим устройствам, приведенным выше, с тою только разницей, что где-либо в нижней части их должен быть размещен трубопровод, имеющий выход в корпус устройства и закрытый сеткой с калиброванными отверстиями для регулируемого непрерывного подвода газа или пара внутрь объема жидкости, находящейся в устройстве.

На рис. 13 приведен один из вариантов подобного устройства.

Следует заметить, что область использования метода «пузырьковой кумуляции» далеко не исчерпывается сказанным выше. Метод имеет очень обширный диапазон применений и может эффективно использоваться, например, для целей двусторонней электрогидравлической очистки непрерывно движущегося проката в абразивной среде, для очистки литья, для очистки на плаву от обрастания днищ корпусов судов, для бурения и других целей.

Для питания при осуществлении данного метода может быть использована любая из электрических схем, приведенных в первой части работы.

VI. ПОЛУЧЕНИЕ ЭМУЛЬСИЙ И ДЕЭМУЛЬГИРОВАНИЕ

Электрогидравлические удары способны весьма эффективно и быстро смешивать между собой в виде мелкодисперсных эмульсий самые разнообразные вещества, которые затем могут не расслаиваться годами. Достигаемая дисперсность эмульсий зависит как от свойств самих смешиваемых компонентов, так и от энергии, затраченной на изготовление эмульсии, а при заданной энергии импульса — от времени обработки ее воздействием электрогидравлического эффекта.

Как показали исследования, электрогидравлическим методом можно осуществлять также и деэмульгирование.

1. Эмульсии типа жидкость + жидкость

Эмульсии двух или нескольких несмешивающихся жидкостей могут быть получены различными способами, каждый из которых осуществляется с помощью специального устройства.

Электрогидравлические удары, диспергирующие жидкости в эмульсии, могут осуществляться как внутри объема самих смешиваемых жидкостей, так и вне их. Учитывая, что многие жидкости, в том числе и вода, при электрогидравлическом воздействии претерпевают значительные химические изменения, осуществление электрогидравлических ударов внутри объема этих жидкостей может оказаться нежелательным. В этом случае электрогидравлические удары осуществляют в объеме вспомогательной жидкости (обычно воды), отделенной от объема, занятого смешиваемыми жидкостями, какой-либо эластичной мембраной, выполненной, например, из резины или гофрированного металла.

На рис. 14 приведен один из вариантов устройств для получения эмульсий, в котором разряд осуществлен в объеме одной из жидкостей (более тяжелой), на поверхность которой налита вторая (более легкая) жидкость.

Устройство работает в непрерывном цикле, для чего в него постоянно через патрубки *3* и *4* вводятся смешиваемые жидкости, а по патрубку *5* выводится образующаяся эмульсия.

На рис. 15 приведен вариант устройства для непрерывного получения эмульсий с разделением эластичной резиновой мембра-

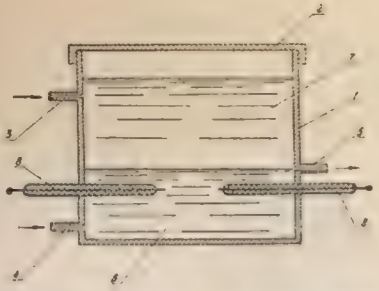


Рис. 14. Эмульгатор с разрядом в «нижней» жидкости:

1—корпус; *2*—крышка эмульгатора; *3*—подача лёгкой жидкости; *4*—подача тяжелой жидкости; *5*—отвод готовой эмульсии; *6*—объём, заполненный тяжёлой жидкостью; *7*—объём, заполненный лёгкой жидкостью; *8*—электроды.

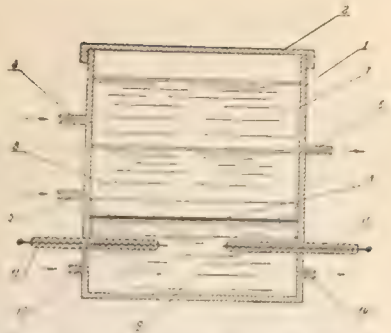


Рис. 15. Вариант эмульгатора с разделением объёмов рабочей жидкости и смешиваемых жидкостей эластичной мембраной:

1—корпус *2*—крышка; *3*—эластичная мембрана; *4*—подача лёгкой жидкости; *5* подача тяжёлой жидкости; *6*—отвод готовой эмульсии; *7*—объём, заполненный легкой жидкостью. *8* - объём, заполненный тяжёлой жидкостью; *9*—объём, заполненный рабочей жидкостью; *10*—подвод и отвод рабочей жидкости; *11*—электроды.

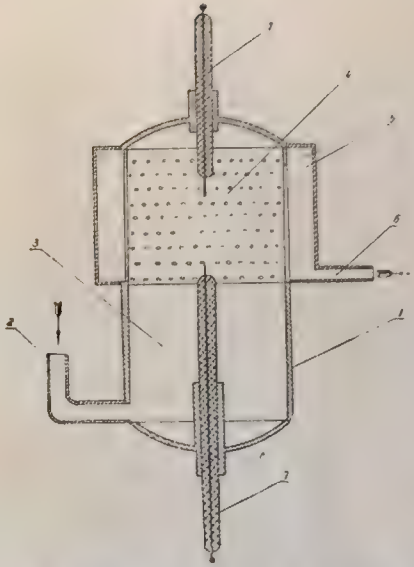


Рис. 16. Вариант эмульгатора для получения эмульсий типа жидкость + твёрдое тело (для материалов, плавающих в жидкости):

1—корпус эмульгатора; *2*—подвод жидкости и эмульгируемого материала; *3* - объём, заполненный жидкостью и материалом; *4*—сетка выводных отверстий в корпусе; *5*—приёмный бункер для суспензии; *6*—выводной патрубок; *7*—электроды.

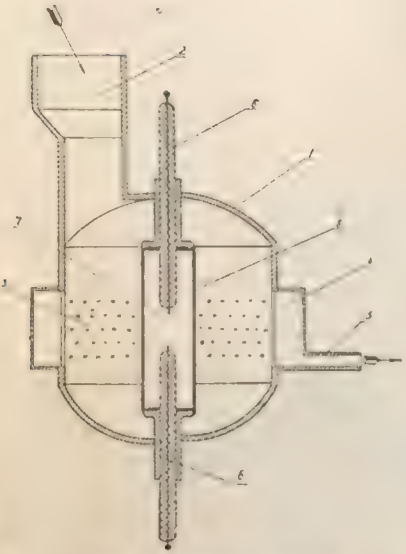


Рис. 17. Вариант эмульгатора для получения эмульсий типа жидкость + твердое тело (для материалов, тонущих в жидкости):

1—корпус эмульгатора; *2*—приемная воронка *3*—сетка выводных отверстий в корпусе; *4*—приёмный бункер для суспензии; *5*—выводной патрубок; *6*—электроды; *7* рабочий искровой промежуток; *8*—эластичная мембрана-баллон, разделяющая объем рабочей жидкости от объёма смешения.

ной *3* объемов, занятых смешиваемыми жидкостями *7* и *8* и вспомогательной жидкостью *9*, в которой осуществляются электрогидравлические удары.

Смешиваемые жидкости подаются по патрубкам *4* и *5*, а образующая эмульсия непрерывно отводится по патрубку *6*. Вспомогательная жидкость может обновляться подачей по трубопроводам *10*.

2. Эмульсии типа жидкость ⁞ твердое тело

Для диспергирования в эмульсию жидкостей и твердых тел разработана конструкция устройства, приведенная на рис. 16 (для случая эмульгирования твердых тел, всплывающих в данной жидкости), и конструкция устройства, показанная на рис. 17 (для случая эмульгирования твердых тел, тонущих в данной жидкости).

Устройство (см. рис. 17) выполнено с отделением рабочего объема от объема, занятого вспомогательной жидкостью, эластичной мембраной *8*. Вспомогательную жидкость здесь также целесообразно непрерывно обновлять.

3. Эмульсии типа жидкость + газ

Для смешивания жидкостей и газов до состояния эмульсии следует использовать явление «воздушной кавитации», описанное выше.

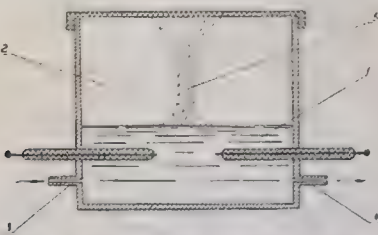


Рис. 18. Эмульгатор для получения эмульсий типа жидкость + газ:

1—смешиваемая жидкость; *2*—смешиваемый газ; *3*—подвод смешиваемой жидкости; *4*—отвод готовой эмульсии; *5* - фонтан жидкости, выбрасываемый при электрогидравлическом ударе.

Устройство для эмульгирования жидкостей и газов, основанное на этом принципе, показано на рис. 18. Конструктивно в нем также может быть осуществлено отделение объема смешения от объема, занятого вспомогательной жидкостью, эластичной мембраной.

4. Деэмульгирование

Процесс эмульгирования наиболее эффективен в непосредственной близости от зоны разряда и довольно быстро падает с удалением от нее.

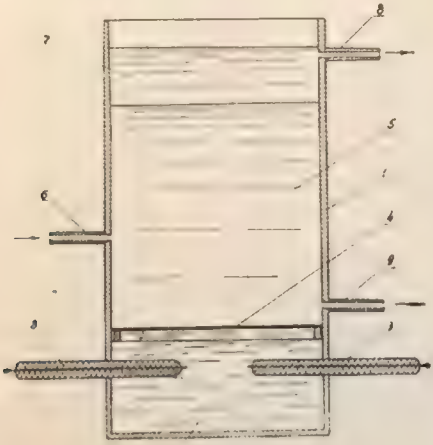


Рис. 19. Деэмульгатор:

1—корпус; *2*—рабочая жидкость; *3*—электроды; *4*—мембрана; *5*—объём, занятый разделяемой жидкой эмульсией; *6*—подача эмульсии; *7*—всплывающий лёгкий компонент; *8*—отвод лёгкого компонента; *9*—отвод тяжёлого компонента.

Опытным путем установлено, что при дальнейшем увеличении расстояния от зоны разряда эффект эмульгирования не только полностью исчезает, но и сменяется обратным процессом — деэмульгированием.

Таким образом, наливая какую-либо жидкость — эмульсию — в удлиненный сосуд, в нижней части которого осуществляются электрогидравлические удары, можно получить в его верхней части постепенное расслоение этой эмульсии на составляющие ее компоненты.

Процесс деэмульгирования может быть легко осуществлен как непрерывный.

На рис. 19 приведен вариант устройства для непрерывного деэмульгирования.

Эмульсия, подлежащая разделению, непрерывно подаваемая в корпус устройства по трубопроводу *6*, поступает в среднюю часть деэмульгатора и разделяется в нем. Более легкий компонент *7*, всплывая, удаляется по трубопроводу *8*, более тяжелый *5*, собираясь внизу, удаляется по трубопроводу *9*. Разряд осуществляется во вспомогательной жидкости *2*, которая отделена от рабочего объема эластичной мембраной *4*.

VII. ДРОБЛЕНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

Задача дробления металлургических шлаков представляет значительный практический интерес.

Шлаки являются сложным конгломератом сплавленных между собою частиц различного химического состава, резко различающихся по механической прочности, в котором зачастую в большом количестве встречаются включения «корольков» (мелких слитков металла), достигающих иногда значительных поперечных размеров.

Шлаки могут поступать на дробление холодными, горячими или даже жидкотекучими. Как правило, они могут отдавать водной среде всякого рода растворимые соединения, делающие воду более проводящей.

Указанное обстоятельство значительно усложняет процесс электрогидравлического дробления шлаков, в связи с чем нами разработан ряд технических и технологических приемов, позволяющих успешно разрешать все эти задачи.

1. Дробление шлаков

Электрогидравлическое дробление холодных шлаковых масс, не содержащих слитков металла, превышающих по крупности верхний предел задаваемой крупности дробления, не встречает особых трудностей. Дробление таких шлаков может вестись на обычных ЭГД. Однако наличие в составе шлака слитков металла, превышающих по своим размерам этот предел, затрудняет решение данной задачи.

При электрогидравлическом дроблении на песок или до сверхтонкого измельчения, по мере дробления шлака, куски-слитки содержащегося в нем металла (железа, чугуна, меди, алюминия и т. п.), не поддающегося электрогидравлическому дроблению, будут накопляться на днище дробилки до тех пор, пока это накопление не вызовет короткого замыкания ее электродов, и тогда процесс дробления прекратится.

Для восстановления процесса электрогидравлического дробления и поддержания его непрерывности необходимо, следовательно, не только периодически или постоянно сбрасывать накопляющийся на днище дробилки металл, но и осуществлять это таким образом, чтобы он, по мере его накопления, не нарушал нормального хода

процесса электрогидравлического дробления и не снижая его показателей.

Указанных целей можно достичь различными путями, один из вариантов такого решения приведен на рис. 20.

В этом конструктивном варианте ЭГД, предназначенной для дробления металлургических шлаков, предусмотрено постепенное опускание днища дробилки *3* с накапливающимися на нем слитками металла и периодический сброс их из корпуса дробилки в специальный приемник *7*, откуда они удаляются обычными способами. Длина рабочего искрового промежутка в этом процессе остается постоянной.

Ввиду того, что процесс электрогидравлического дробления осуществляется в непрерывно заменяемой жидкой среде — воде, заполняющей весь корпус дробилки, а при необходимости и приемный бункер ее, то в увеличенный по размерам и заполненный водой бункер дробилки может поступать не только горячий, но даже и огненно-жидкий шлак, который будет быстро охлаждаться, интенсивно растрескиваясь и грануируясь при этом, и поступать далее на дробление уже холодным и хрупким.

Отдаваемые шлаком в переходящие в раствор соли и соединения, делающие воду проводящей, будут быстро разбавляться до безопасных концентраций и уноситься поступающей водой из зоны дробления.

В этой связи следует заметить, что наличие в воде растворенных солей, кислот и щелочей весьма неблагоприятно влияет на протекание процесса электрогидравлического дробления, увеличивая проводимость воды и в силу этого резко повышая потери энергии в предразрядный период при прорастании стримеров — наличие электролитов резко снижает эффективность и экономичность электрогидравлического дробления.

Большой интерес может представить применение электрогидравлического дробления металлургических шлаков, включенное как технологический элемент в металлургический процесс в целях непрерывной переработки и удаления шлака непосредственно от домен, мартенов, металлургических печей и т. п. с последующим гидротранспортированием его в отвал или на дальнейшую переработку.

Следует иметь в виду, что металлургические шлаки, переработанные в продукт сверхтонкого измельчения, сразу же после их выхода из металлургического процесса, дают достаточно качественный цемент, а удаленный из них металл может быть тут же использован по своему назначению. Следует полагать, что применение этого процесса полностью устранит необходимость в отвалах.

Исходя из ранее сказанного, необходимо отметить, что в процессе электрогидравлического дробления в воду из шлаков будут переходить некоторые необходимые для технических целей химические элементы в виде их растворимых соединений, а также ряд соединений ценных как удобрения в сельском хозяйстве и т. п.

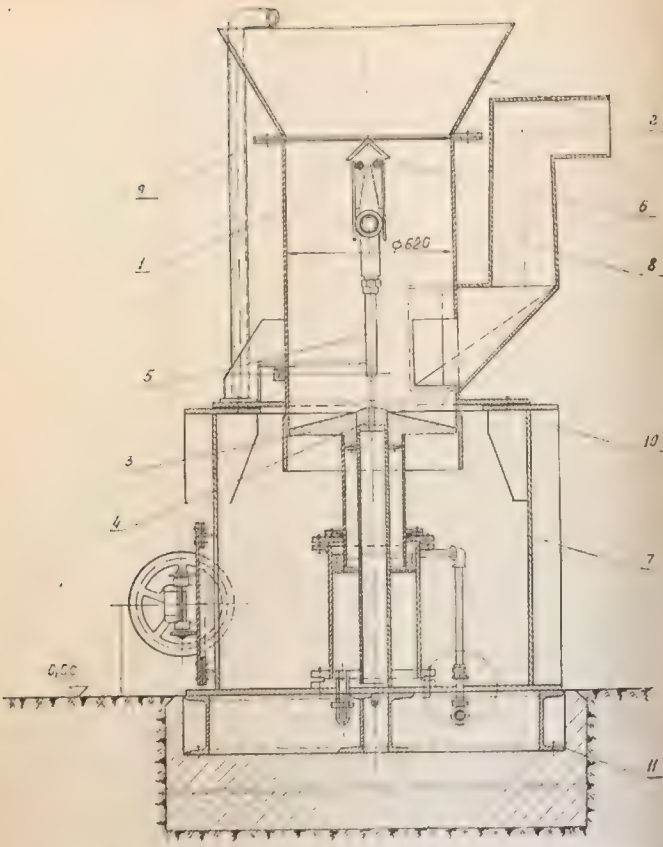


Рис. 20. Шлаковая дробилка для тонкого измельчения со сбросом выделившихся слитков металла:

1—корпус дробилки; *2*—приёмная воронка; *3*—опускающееся дно дробилки; *4*—неподвижный цилиндр; *5*—отрицательный электрод; *6*—защита электрода—затвор бункера; *7*—металлоприёмник; *8*—классификатор; *9*—подача основной массы шлаковой ванны; *10*—основание дробилки; *11*—фундамент дробилки.

2. Выделение металла из шлаков

Из рассмотрения процессов, возникающих при электрогидравлическом дроблении металлургических шлаков, вытекает как следствие еще одно чрезвычайно перспективное применение электрогидравлического эффекта для специального выделения металла из шлаков или из руд, содержащих самородные металлы.

Опыт показал, что из любого металлургического шлака цветной или черной металлургии без особых на то затрат, без пыли и сложных устройств, с расходом энергии 5—15 *квт-ч* на тонну перерабатываемого шлака может быть выделено до 95—98%, содержащегося в нем металла. «Корольки» и мельчайшие чешуйки металла получаются при этом совершенно чистыми без всяких следов и частиц шлаковых включений.

Это же положение, естественно, относится и ко всем рудам, содержащим чистый самородный металл в виде вкраплений.

Выделение может быть организовано как в прерывном, так и в непрерывном процессе с применением для рассматриваемого случая, например, устройства, показанного на рис. 20.

Для осуществления прерывного процесса может быть изготовлено устройство с использованием обычной бетономешалки, в которую вводится один центральный неподвижный электрод таким образом, чтобы его оголенный вниз конец образовал с корпусом бетономешалки и слоем шлака рабочий искровой промежуток.

Непрерывно поступающая в корпус вода по мере дробления шлака вымывает и удаляет его, а медленное вращение корпуса бетономешалки постоянно подводит к зоне разрушения еще нераздробленные куски шлака. После того как в корпусе останется только один чистый металл, вращение его прекращается, корпус наклоняется и выделенный металл ссыпается в приемник. Далее процесс повторяется в той же последовательности.

Выделение самородных металлов из руд может вестись также и в коллоидных ЭГД.

Так как размеры частиц включений золота в породе в среднем очень малы, то появление в дробилке крупного самородка можно легко определить по характерному звуку нарушения или прекращения процесса дробления.

Приводя в движение систему, открывающую днище, аналогичную конструкции, показанной на рис. 20 (которая должна быть предусмотрена в конструкции таких дробилок), можно легко выбросить самородки наружу и продолжить процесс дробления остальной массы.

Основную массу чешуек металла можно выделять и улавливать ловушками либо при движении этих частиц в восходящем потоке, либо обычно применяемыми в этих случаях средствами.

VIII. ДРОБЛЕНИЕ КИМБЕРЛИТОВ

Одной из перспективных областей применения электрогидравлического дробления является дробление алмазоносных руд — кимберлитов.

Кимберлит является горной породой, содержащей относительно ее общей массы ничтожную долю процента драгоценных алмазов.

Алмаз — твердейший из минералов — является материалом, легко выдерживающим огромное всестороннее сжатие, но довольно нестойким — хрупким к ударам.

Исходя из специфики процессов электрогидравлического разрушения горных пород и других материалов, можно сказать, что алмаз, не разрушаясь, должен легко противостоять огромным объемным давлениям, возникающим при электрогидравлических ударах, даже находясь внутри зоны разрушения, но, по-видимому, может разрушиться от ударов либо о другие алмазы, либо о куски твердой породы в те моменты, когда он соприкасается с ними вблизи поверхности зоны разрядного канала — в области сверхвысоких давлений.

Так как алмазов в породе очень мало, а вмещающая их порода не слишком тверда, то вероятность того, что именно такое соприкосновение при таких условиях его может произойти, ничтожно мала, что и подтверждается прямым опытом.

Даже при специальной загрузке в ЭГД нескольких кристаллов алмазов вместе с кусками наиболее твердых включений, содержащихся в кимберлитах, было получено тончайшее размельчение всей породы без каких-либо повреждений самих алмазов.

Чтобы сохранить наиболее крупные, а поэтому и наиболее ценные алмазы, следует вести процесс не непрерывно, а по стадиям с отбором выделяющихся алмазов на каждой из этих стадий.

Основная масса пустой породы (до 80%) на первой же стадии дробления отойдет в виде пульпы в отвал за счет отмечавшейся нами ранее резко выраженной избирательности процесса электрогидравлического дробления.

Таким образом, на последующие стадии дробления будет поступать все меньше материала, что может существенно облегчить и ускорить весь процесс выделения алмазов.

IX. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАЗРУШЕНИЯ

Еще в 1950 г. нами были разработаны некоторые своеобразные методы электрогидравлического воздействия на материалы, в том числе и для целей их разрушения. Предлагаемые методы могут представить значительный интерес для ряда случаев практики. Все области применения этих методов, являющихся особенно перспективными, еще не охвачены нашими исследованиями.

1. Метод теплового взрыва

Наибольший интерес представляет способ получения электрогидравлических ударов методом взрыва металлической проволоки, ленты и т. п. тонких металлических проводников, располагаемых между электродами разрядника по прямой или кривой линии или имеющих разнообразные специальные формы.

Применяемый нами для ряда специальных целей деформации или разрушения, например, для металлообработки: штамповки, резки и т. п. указанный способ может представить интерес и для дробления, например: получения направленных, контурных или локальных кумулятивных разрушений.

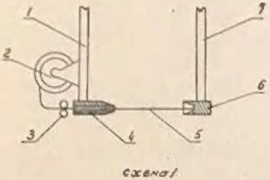
Сущность метода теплового взрыва состоит в следующем.

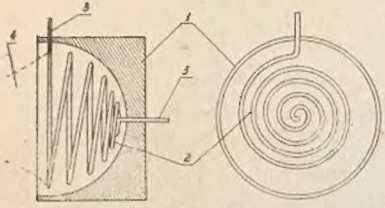
Если между двумя электродами, помещенными в жидкость, расположить тонкую металлическую проволоку, замыкающую оба электрода, а электроды подсоединить к обычной электрической схеме, служащей для воспроизведения электрогидравлического эффекта, то при подаче импульса на электроды произойдет тепловой взрыв этой проволоки, сопровождающийся всеми сопутствующими электрогидравлическому удару явлениями.

При осуществлении этого будут отсутствовать все обязательные для электрогидравлического эффекта предразрядные процессы, включая сюда прорастание стриммеров, образование разрядного канала и т. п., а следовательно, будут отсутствовать и все те энергетические потери, которые, составляя 1—10% к общему количеству энергии, поступающей в разряд, расходовались за предразрядное время.

Эти потери заменяются потерями энергии на нагревание и испарение проволоки в жидкости.

Возникающий при этом электрогидравлический удар практически ничем не отличается от электрогидравлического удара, образованного обычными средствами, что свидетельствует о незначительности упомянутых выше потерь.





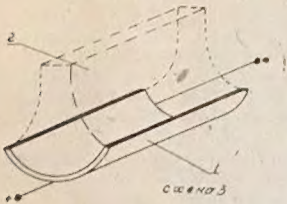


Рис. 21. Схема устройства для получения высоких давлений методом теплового взрыва.

Схема 1—устройство для подачи проволоки или ленты в рабочий промежуток:

1—отрицательный заземленный электрод; *2*—катушка с проволокой или лентой; *3*—направляющие или тянущие ролики; *4*—контактный полый конец электрода; *5*—взрываемая проволока или лента; *6*—приёмный контактный конец положительного электрода; *7*—положительный электрод.

Схема 2—устройство для получения мощной стержневой кумулятивной струи:

1—отражающая сферическая поверхность; *2*—взрываемая проволока или лента; *3*—контакты для подвода импульса; *4*—кумулятивная струя.

Схема 3—устройство для получения плоской кумулятивной струи:

1—поперечно-изогнутая металлическая лента, взрываемая импульсом тока; *2*—форма плоской кумулятивной струи.

Пары воды, образующиеся здесь в несколько бо́льшем количестве, и пары металла быстро конденсируются, и поэтому кавитационная полость и сопровождающий ее захлопывание кавитационный гидравлический удар также по существу ничем не отличаются от обычного.

Однако специфика протекания процесса имеет ряд особенностей, представляющих практический интерес.

Оказывается, что с помощью такого способа можно осуществлять электрогидравлические удары в непосредственной близости от металлических поверхностей, внутри сильно проводящих жидкостей и даже внутри расплавов некоторых металлов.

Некоторым недостатком способа является необходимость установки новой проволоки после каждого взрыва. Однако этот недостаток для ряда случаев легко преодолеть, образовав в соответствии со *схемой 1* (рис. 21) непрерывную, управляемую подачу проволоки с катушки, закрепленной на одном из электродов (например, на заземленном электроде), по направлению к другому электроду. Обычными средствами легко получить синхронизацию движения проволоки с чередованием подаваемых на нее импульсов.

Интересный результат можно получить при выполнении проволоки в виде ленты с приданием ей поперечной кривизны, в соответствии со *схемой 3*. При этом в силу фокусирующего действия ленты в жидкости по всей длине ленты образуется жидкая кумулятивная струя, могущая осуществить заданное локальное разрушение помещенного вблизи нее материала или изделия.

Еще более интересный результат получится при использовании устройства, приведенного на *схеме 2*.

Выполненная в виде спирали, навитой по сферической или другой поверхности, проволока или лента после взрыва образует жидкую кумулятивную струю огромной разрушительной силы. Применение здесь всякого рода отражателей способно еще более усилить этот эффект.

По нашему мнению, применение указанных способов может быть чрезвычайно многообразным, например: в геофизике (для сейсморазведки), в металлообработке (для резки, гибки и штамповки), для двигателей, для взрывания горных пород под водой и для многих других целей.

2. Электропневматика

Весьма многообещающей областью применения является также предложенная нами еще в 1950 г. электропневматическая обработка материалов.

При этом виде обработки механическое воздействие разрушающих факторов разряда на материал осуществляется в газовой среде. Поскольку эта среда почти в миллион раз больше сжимаема, чем жидкость, то и соответствующий механический эффект будет пропорционально слабее, однако рядом специальных приемов его можно значительно усилить, а следовательно, и применить для некоторых конкретных случаев практики.

До известной степени моделируя условия протекания разряда в жидкой среде путем осуществления его в узком или капиллярном канале, можно получить в нем значительные давления и интенсив-

ный выброс плазмы из отверстий канала таким образом, что он будет играть роль своеобразного микрореактивного сопла.

Известно, что реактивные сопла уже используются современной горной техникой для целей бурения горных пород с весьма большой эффективностью.

Комбинируя электропневматический метод воздействия с методом теплового взрыва, можно получить еще более эффективные разрушения, поскольку тяжелые пары металлов, включенные в струю плазмы, двигающуюся с космическими скоростями, способны оказать более мощное воздействие на материал.

Особый интерес представляет собою применение этого варианта для осуществления двигателей с металлическими топливом.

Используя преимущественно тепловое действие плазмы, поскольку ее температура весьма велика, и направляя механическое действие только на удаление продуктов, разрушенных тепловым воздействием, получим еще один вариант использования способа. Это направление в последние годы развивается особенно интенсивно, о чем свидетельствуют многочисленные работы, опубликованные в нашей и зарубежной литературе, посвященные вопросам получения и применения высокотемпературной плазмы газового разряда.

* * *

Изложение основных положений, необходимых при проведении работ по практическому использованию электрогидравлического эффекта для целей разрушения материалов (дробления, измельчения, диспергирования и т. п.), как уже указывалось, не претендует на исчерпывающую полноту охвата всех вопросов и проблем электрогидравлического дробления и является только кратким конспектом сведений, необходимых в повседневной практической работе.

Литература

1. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект. Машгиз, 1955.

2. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и возможности его применения в горном деле. «Строительные материалы, изделия и конструкции», 1956, № 9.

3. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и возможности его применения. ЛДНТП, 1959. Серия — «Строительная промышленность», выпуск 2